

Г. Д. ВЛАСОВ

Проектирование систем электро- снабжения летательных аппаратов



1967

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Г. Д. ВЛАСОВ

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ



ИЗДАТЕЛЬСТВО
«МАШИНОСТРОЕНИЕ»

Москва 1967

В книге изложены принципы проектирования систем электроснабжения летательных аппаратов. Рассмотрены конфигурация и защита питательных сетей, приводы постоянной скорости, первичные и вторичные источники энергии, аппаратура регулирования и защиты. Описаны различные варианты первичных и вторичных энергетических систем постоянного и переменного тока и их влияние на надежность электроснабжения и безопасность полета.

Книга представляет интерес для широкого круга специалистов, работающих в области проектирования, производства и эксплуатации электрического оборудования летательных аппаратов. Она будет полезна также студентам авиационных вузов. Иллюстр. 203. Библ. 27 назв.

Рецензент канд. техн. наук **Н. Т. Коробан**

Редактор канд. техн. наук **М. А. Ермилов**

ПРЕДИСЛОВИЕ

Оборудование современных летательных аппаратов представляет собой ряд комплексов, объединенных в единую систему. Работа их невозможна без использования электрической энергии, без создания разнообразных электрических машин, приводов, аппаратуры регулирования и защиты. В последнее время наблюдается невиданный рост скоростей и высот полета. Это поставило перед научными и инженерно-техническими работниками ряд сложнейших задач по обеспечению высокого качества электропитания с большей надежностью, живучестью и стабильностью работы на всех режимах полета, включая аварийные.

Совершаются энергосистемы переменного и постоянного тока, продолжаются работы по стабилизации частоты генераторов переменного тока без применения приводов постоянной скорости, получению электрической энергии с помощью термоэлектрических, электрохимических и ядерных источников тока, повышению точности стабилизации параметров и к.п.д. первичных и вторичных источников энергии, повышению надежности и устойчивости работы энергосистем при высоких температурах в условиях сверхзвуковых высотных полетов.

Данная книга представляет собой попытку связать теоретические вопросы с практическими оптимальными решениями и рекомендациями по проектированию систем электроснабжения, по методике разработки и оформлению технической документации, определению критериев веса и надежности, выбору оптимальной конфигурации и защиты питательных сетей и принципам построения наиболее надежных первичных и вторичных энергосистем постоянного и переменного тока.

В книге систематизированы материалы по первичным и вторичным энергосистемам, рассмотрены оптимальные варианты систем передачи, распределения электроэнергии, типы защиты электрических сетей и дана сравнительная оценка и рекомендации по выбору оптимальных систем электроснабжения.

Собранный в книге материал может быть полезен не только конструкторам, занимающимся проектированием систем электроснабжения, но и специалистам по автоматике и другому оборудованию, участвующим в разработке новых систем электропитания.

В книге основное внимание уделено изложению методов проектирования, расчета и эксплуатации систем электроснабжения.

Автор выражает благодарность проф. Н. Т. Коробану и канд. техн. наук М. А. Ермилову за критические замечания и ценные предложения, сделанные при рецензировании и редактировании книги, докт. техн. наук В. Т. Морозовскому и инженерам Б. Л. Керберу, А. В. Шапошникову, Н. Ф. Макокину и Э. Н. Коршунову за полезные советы, данные при просмотре рукописи, инж. В. П. Лабутину, оказавшему большую помощь при подготовке рукописи, инж. Н. М. Никитиной и Л. Ф. Павлюковой, выполнившим значительную часть графических работ. Все критические замечания по книге автор просит присылать по адресу: Москва, К-51, Петровка, 24, издательство «Машиностроение».

РАЗДЕЛ ПЕРВЫЙ

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

Глава I

**ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

§ 1. РОЛЬ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ И ИХ КЛАССИФИКАЦИЯ

На летательных аппаратах для питания специального оборудования применяются различные виды энергии: гидравлическая, пневматическая, механическая и электрическая. Электрическая энергия наиболее универсальна и широко используется во всех системах самолетного оборудования.

Электрифицированное оборудование по сравнению с другими видами оборудования имеет ряд существенных преимуществ: надежность и живучесть, минимальную уязвимость, небольшой вес и объем, простота и удобство эксплуатации.

Электрическую энергию можно легко передавать на расстояние и распределять между отдельными потребителями, преобразовывать в другие виды энергии. С ее помощью легко автоматизировать ряд операций, уменьшить напряженность работы экипажа с тем, чтобы сосредоточить его внимание на решении главных задач.

Электрификация и автоматизация самолетных систем значительно подняла удельный вес электрооборудования в сравнении с другими элементами конструкции самолета. Мощность установленных источников электроэнергии доходит до 250 кВт при плотности электрической сети свыше 100 км.

Надежность и точность работы различных систем летательных аппаратов в первую очередь зависит от надежности, бесперебойности и качества электроснабжения, которое обеспечивается первичными и вторичными энергосистемами постоянного и переменного тока.

Бесперебойное снабжение электроэнергией высокого качества приобретает весьма важное значение для потребителей систем управления и навигации во всех режимах полета, особенно при взлете

и посадке, когда даже кратковременное отсутствие питания или снижение его качества может привести к катастрофе.

Для повышения надежности и безопасности полета появилась необходимость полного дублирования систем управления и навигации. Эта задача может быть решена с применением отдельных каналов питания дублированных систем при параллельной работе источников энергии. В режимах взлета и посадки питание дублированных каналов целесообразно проводить от двух автономных систем, что гарантирует бесперебойность и высокое качество питания хотя бы одного канала жизненно важных систем при отказе любого канала питания.

Для обеспечения автономности систем электропитания во время взлета и посадки необходимо разделить первичные и вторичные энергосистемы на группы (не менее двух) с параллельной работой источников в каждой группе. При этом выход из строя отдельных источников или участков сети одного канала не должен влиять на нормальную работу других.

Вследствие значительного разнообразия типов, назначений и условий эксплуатации летательных аппаратов невозможно создать единую оптимальную систему электроснабжения. Поэтому выбор рациональной системы электроснабжения определяется конкретным типом и назначением летательного аппарата.

Во всех случаях (независимо от типа и назначения летательного аппарата) система электроснабжения состоит из первичной (основной) и соответствующего комплекса вторичных (вспомогательных) энергетических систем и получает наименование по первичной энергосистеме.

Первичные энергосистемы получают электрическую энергию от первичных источников и обеспечивают непосредственное питание подавляющего большинства потребителей.

Основными источниками энергии в них являются генераторы, приводимые во вращение непосредственно от авиадвигателей или через приводы постоянной скорости, а вспомогательными — аккумуляторы или генераторы, приводимые во вращение от автономных двигателей или турбин, вращающихся от встречного потока воздуха.

Первичные энергосистемы классифицируются по роду тока и частоте на три основных типа:

1. Энергосистема постоянного тока.
2. Энергосистема трехфазного переменного тока переменной частоты.
3. Энергосистема трехфазного переменного тока постоянной частоты.

Вторичные энергосистемы получают электрическую энергию от вторичных источников, преобразующих первичную энергию по роду тока, напряжению и частоте, и обеспечивают питанием соответствующие потребители.

Источниками энергии в них являются вращающиеся или статические преобразователи постоянного тока в переменный, или

наоборот, в зависимости от типа первичной энергосистемы. Если частоты первичной и вторичной энергосистем переменного тока совпадают, то напряжение преобразуют трансформаторы.

Вторичные энергосистемы по роду тока и частоте классифицируются на четыре основных типа:

1. Энергосистема однофазного переменного тока постоянной частоты.
2. Энергосистема трехфазного переменного тока постоянной частоты.
3. Энергосистема трехфазного переменного тока прецизионной частоты.
4. Энергосистема постоянного тока.

Основные параметры первичных и вторичных энергосистем приведены в табл. 1. 1.

Таблица 1.1

Основные первичные и вторичные энергосистемы

Системы	Тип энергосистемы	Напряжение источника энергии в	Напряжение на клеммах потребителя в	Частота $гц$	Примечание
Первичные	Постоянного тока напряжением 27 в	$28,5 \pm 3\%$. Допускается $28,5 \pm 4\%$ $28,5 \pm 7\%$	$27 \pm 10\%$. Допускается при аварийном режиме 20 в	—	$U=28,5 \pm 2\%$ с точным регулированием, Пульсации 8 %
	Трехфазного переменного тока напряжением 200/115 в переменной частоты	$208/120 \pm 3\%$ $208 \pm 3\%$	$200/115 \pm 5\%$ $200 \pm 5\%$	300—900	$f=400 \pm 5\%$ $гц$, если привод от турбовинтового двигателя
	Трехфазного переменного тока напряжением 200/115 в постоянной частоты	$208/120 \pm 2\%$ $208 \pm 2\%$	$200/115 \pm 5\%$ $200 \pm 5\%$	$400 \pm 1\%$. Допускается $400 \pm 2\%$	$U=208 \pm (0,1-1)\%$ с точным регулированием
Вторичные	Однофазного переменного тока напряжением 115 в постоянной частоты	$115 \pm 3\%$	$115 \pm 5\%$	$400 \pm 5\%$	На некоторых преобразователях $f=400^{+7}_{-5}\%$ $гц$

Системы	Тип энергосистемы	Напряжение источника энергии в	Напряжение на клеммах потребителя в	Частота гц	Примечание
Вторичные	Трехфазного переменного тока напряжением 36 в постоянной частоты	$36 \pm 3\%$. Допускается $37 \pm 3\%$	$36 \pm 5\%$	$400 \pm 2\%$	В специальных преобразователях $f=400 \pm 1\%$ или $400 \pm 0,1\%$ гц
	Трехфазного переменного тока напряжением 36 в прецизионной частоты	$36 \pm 3\%$	$36 \pm 5\%$	$400 \pm 0,05\%$	Применяются также частоты 500, 800, 1000, 1200, 2000, 4000 и 10 000 гц
	Постоянного тока напряжением 27 в	$28,5^{+5}_{-9}\%$	$27 \pm 10\%$	—	Пульсации напряжения 8%

Кроме указанных в табл. 1. 1, в отдельных случаях применяются первичные энергосистемы постоянного тока напряжением 112 в и однофазного переменного тока напряжением 200 и 115 в переменной частоты, а также вторичные энергосистемы однофазного переменного тока напряжением 47 и 12 в переменной и постоянной частоты.

§ 2. КРАТКИЙ ИСТОРИЧЕСКИЙ ОЧЕРК РАЗВИТИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

История развития электрификации летательных аппаратов охватывает относительно небольшой период времени и тесно связана с прогрессом авиационной техники и электротехники.

В 1869 г. А. Н. Ладыгин впервые в мире спроектировал летательный аппарат тяжелее воздуха с электрическим двигателем — «электролет». Питание электродвигателей предполагалось от специальных аккумуляторов, созданием которых занимался П. Н. Яблочков.

В 1912 г. в России были построены первые бомбардировщики «Русский витязь», «Илья Муромец» и «Святогор», где электричество было применено для зажигания, освещения, обогрева и радиосвязи. Источниками энергии служили специальные генераторы переменного тока мощностью 0,5—2 квa , приводимые во вращение от авиадвигателей или ветрянок.

Первые самолеты имели системы электроснабжения переменного тока частотой 600—1000 гц , так как для основных потребителей

лей — искровых радиотелеграфных станций — требовался переменный ток, а для освещения и нагрева род тока не имеет значения.

В 1919 г. авиация перешла на систему электроснабжения постоянного тока напряжением 8 в, источниками энергии в которой служили аккумулятор и генератор с ветродвигателем мощностью 36 вт. Напряжение бортовой сети было повышено в 1923 г. до 12 в, а в 1930 г. до 24 в и сохранилось таким до 1939 г.

До 1929 г. применялись генераторы постоянного тока мощностью не более 250 вт, приводимые во вращение ветродвигателями.

В 1934 г. появились генераторы с приводом от основного авиадвигателя, мощность которых к 1936 г. составила 500 вт, а к 1939 г. — 1000 вт.

В 1934 г. на самолете «Максим Горький» впервые широко был применен трехфазный переменный ток напряжением 120 в частотой 50 гц и постоянный ток напряжением 27 в. Источниками энергии служили два трехфазных генератора переменного тока мощностью 3 и 5,5 ква напряжением 120 в и два генератора постоянного тока мощностью 3 и 5,8 кВт напряжением 27 в, которые приводились во вращение двумя специальными двигателями внутреннего сгорания.

Переломным этапом в развитии электрификации самолетов было создание в 1939 г. пикирующего бомбардировщика Пе-2, на котором впервые были широко применены электромеханизмы шасси, стабилизатора, щитков, управления радиаторами, триммерами и др. Пятились потребители постоянным током напряжением 27 в от двух генераторов мощностью 1 кВт каждый.

Начиная с 1939 г. непрерывно увеличивается количество и мощность потребителей, протяженность электрической сети и характер потребителей изменяется по роду тока, напряжению и частоте. Значительно усложняется производство, преобразование, передача и распределение электрической энергии. Изменяются системы электроснабжения и возрастает их роль. Электрическая энергия становится важнейшим видом питания сложного комплекса оборудования летательных аппаратов.

С 1939 г. идет интенсивное развитие первичных энергосистем постоянного тока напряжением 27 в, основными источниками энергии в которых являются генераторы постоянного тока, приводимые во вращение от авиадвигателей, а резервными — аккумуляторные батареи.

За этот период мощность генераторов увеличилась с 1 до 18 кВт в единице, а количество с 1—2 до 8—12 шт. на летательный аппарат, при этом установленная мощность энергосистем возросла в 100—200 раз, достигнув к середине 50-х годов максимальной величины. Одновременно изменялись системы распределения электрической энергии (централизованные, децентрализованные и смешанные), конфигурации (разомкнутые и замкнутые) и защита питаемых сетей.

К середине 50-х годов возросли скорость и высота полета, что вызвало необходимость качественного изменения источников энергии, аппаратуры и питательной сети. Появились бесконтактные генераторы, интенсивные системы охлаждения, статические регуляторы напряжения и совершенные системы защиты от обратных токов, перенапряжений, коротких замыканий и других повреждений. Получили распространение кольцевые многоканальные питательные сети с двусторонней защитой, обладающие повышенной надежностью.

Для питания ряда приборов, сельсинных передач, радио и радиолокационной аппаратуры и другого оборудования потребовался постоянный ток повышенного напряжения и переменный ток постоянной частоты. Поэтому параллельно с первичной энергосистемой постоянного тока развиваются вторичные энергосистемы. Источниками энергии этих систем являются вращающиеся умформеры, однофазные преобразователи напряжением 115 в частотой 400 гц и мощностью от 100 до 6000 в_а, трехфазные преобразователи напряжением 36 в частотой 400 гц и мощностью от 70 до 3000 в_а! В последнее время получают распространение статические преобразователи.

Практическое применение нашли вторичные энергосистемы с раздельной работой преобразователей. В начальный период (до 50-х годов) преобразователи использовались как индивидуальные источники питания отдельных потребителей. В дальнейшем, по мере роста количества и мощности потребителей и источников, преобразователи стали применяться для группового питания потребителей.

В связи с возросшей мощностью потребителей и необходимостью увеличения надежности и снижения веса электрооборудования в 50-е годы начинают интенсивно развиваться первичные энергосистемы переменного тока напряжением 200/115 в переменной и постоянной частотой 400 гц. Появились генераторы мощностью от 7,5 до 120 к_{ва} в единице, а установленная мощность энергосистемы летательных аппаратов достигла 250 к_{вт}.

В начальный период эти энергосистемы развивались как однофазные переменной частоты и использовались для вспомогательных целей (обогрев, бытовое оборудование и др.) на летательных аппаратах с основной энергосистемой постоянного тока. В последнее время энергосистемы трехфазного переменного тока получают распространение как основные первичные энергосистемы, в которых используются приводы постоянной скорости, бесконтактные генераторы и статические элементы регулирования и защиты.

Для обеспечения питанием потребителей постоянного тока в комплексе с первичными энергосистемами трехфазного переменного тока развиваются маломощные вторичные энергосистемы постоянного тока напряжением 27 в, в которых используются статические источники энергии, преобразующие переменный ток в постоянный.

В настоящее время системы электроснабжения развиваются в двух направлениях — с первичными энергосистемами постоянного

тока напряжением 27 в и с первичными энергосистемами трехфазного переменного тока напряжением 200/115 в и применяются в зависимости от типа и назначения летательного аппарата.

§ 3. УСЛОВИЯ РАБОТЫ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Системы электроснабжения летательных аппаратов работают в условиях, значительно отличающихся от наземных. На их работу оказывают влияние высота и скорость полета, механические перегрузки и произвольное положение в пространстве.

Высотность характеризуется параметрами окружающего воздуха: температурой, плотностью, давлением, влажностью, составом, диэлектрической прочностью, теплоемкостью и пр.

В пределах тропосферы (до 11 км) температура воздуха с увеличением высоты равномерно понижается, затем остается постоянной (на высотах от 11 до 30 км) равной $-56,5^{\circ}\text{C}$, далее повышается, достигая 0°C на высоте 40 км.

С увеличением высоты снижаются давление и плотность воздуха, количество влаги и кислорода. Одновременно повышается концентрация озона.

Относительная влажность воздуха может достигать 98% при температуре окружающего воздуха $+20^{\circ}\text{C}$.

При снижении давления диэлектрическая прочность воздуха уменьшается. На высоте 15 км диэлектрическая прочность снижается в 2,5 раза, вследствие чего возрастает продолжительность горения дуги.

Изменение параметров окружающего воздуха с увеличением высоты оказывает отрицательное влияние на работу электрических систем. Так, снижается эффективность охлаждения (особенно в стратосфере), ухудшаются условия коммутации электрических машин, повышается степень искрения и износ щеток, увеличивается момент трогания механизмов вследствие сгущения смазки, ухудшается работа коммутационных устройств в связи с возрастанием ионизации и проводимости воздуха, увеличивается хрупкость изолирующих материалов, резко ухудшается работоспособность электролитических конденсаторов и аккумуляторных батарей вследствие увеличения их внутреннего сопротивления или замерзания электролита.

Скорость полета, увеличиваясь, повышает температуру пограничного слоя и каркаса летательного аппарата, что приводит к ухудшению условий охлаждения, увеличению коррозии, снижению механической прочности, ухудшению свойств изолирующих материалов и т. д.

Изменение температуры в широких пределах приводит к изменению сопротивления обмоток, упругих свойств пружин, линейных размеров и т. п., что меняет настройку аппаратуры.

Механические перегрузки (вибрации, толчки, удары, динамические силы) существенно влияют на работу и прочность электрооборудования.

Частота и амплитуда вибрации определяется типами летательного аппарата и первичного двигателя. Частота вибрации обычно колеблется от 0,5 до 500 гц, а перегрузки достигают 10g и более.

Положение в пространстве. Летательный аппарат и все находящиеся на нем электрооборудование может занимать произвольное положение в пространстве, что оказывает влияние на конструкцию электрических систем и вызывает дополнительные трудности при проектировании аппаратуры и ее компоновке в соответствующих отсеках.

§ 4. ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К СИСТЕМАМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Технические требования к системам электроснабжения летательных аппаратов являются основным руководящим материалом при их проектировании, установке и эксплуатации.

Важность и сложность функций, выполняемых системами электроснабжения, и специфичность условий их эксплуатации предъявляет к ним весьма высокие требования.

Основные из них следующие:

1. Безотказность и надежность работы систем в любых условиях полета: при различных скоростях, ускорениях, перегрузках, положениях в пространстве, высотах, температурах, давлениях, влажности и химическом составе окружающей среды.

2. Малая уязвимость и большая живучесть, т. е. способность системы продолжать работу при получении повреждений.

3. Автономность — способность системы включаться и сохранять номинальный режим без постороннего источника энергии в условиях наземной подготовки и полета.

4. Минимальный полетный вес и габариты при максимально возможном к. п. д. в крейсерском режиме работы. Снижение к. п. д. ведет к дополнительным затратам топлива, увеличению веса и мощности основного двигателя и, следовательно, повышению веса всего летательного аппарата.

5. Высокое качество электрической энергии, т. е. постоянство напряжений и частоты. Отклонение этих параметров за допустимые пределы приводит к нарушению нормальной работы потребителей или выходу их из строя.

6. Безопасность эксплуатации и обслуживания — использование пониженного напряжения для цепей управления на пилотируемых летательных аппаратах, применение герметизированной коммутационной и защитной аппаратуры (особенно для систем, расположенных вблизи топлива, масла и кислорода), применение лучших изоляционных материалов в конструкциях агрегатов и распределительных устройств и др.

7. Простота и удобство монтажа, обслуживания и замены элементов и узлов в процессе производства и эксплуатации.

8. Высокая механическая прочность — в первую очередь вибропрочность и виброустойчивость, когда элементы системы должны выдерживать вибрации и перегрузки в течение всего срока службы без механических повреждений, не вступать в резонансные колебания в пределах частот, имеющих место на летательном аппарате.

9. Высокая химическая стойкость, т. е. отсутствие коррозии и разрушений изоляции и других покрытий элементов системы при воздействии влаги, морской воды, паров бензина, керосина, масла и других агрессивных примесей.

10. Высокая электрическая и термическая прочность.

11. Безопасность в отношении пожара, т. е. наличие мер, предупреждающих возможность возникновения пожара и применение огнестойких материалов.

12. Взрывобезопасность, т. е. возможность локализации взрыва внутри агрегата без каких-либо вредных последствий для сопряженных с ним элементов.

13. Быстрая готовность к действию.

14. Отсутствие помех работе радиооборудования, магнитных компасов, измерительных приборов, поляризованных реле и т. п., возникающих за счет пульсаций напряжения на коллекторах генераторов, на выходе выпрямительных блоков, вибрирующих контактов, а также магнитных полей, создаваемых различными агрегатами и проводами системы электроснабжения.

Отсутствие взаимного влияния элементов системы друг на друга.

15. Взаимозаменяемость и унификация отдельных узлов и деталей.

16. Большой срок службы при минимальной стоимости производства, эксплуатации и ремонта.

Некоторые из перечисленных требований могут оказаться противоречивыми, тогда при проектировании следует найти компромиссное решение, учтя наиболее существенные из них для конкретного случая.

Требования, присущие только определенным элементам или системам, отмечены в соответствующих разделах.

Глава II

МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

§ 1. РАЗБИВКА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ПО ФУНКЦИЯМ И ОТСЕКАМ

На процесс проектирования, лабораторные исследования, постройку, испытания и эксплуатацию электрических систем летательных аппаратов существенное влияние оказывает методика разработки и оформление технической документации.

Рациональная методика обеспечивает упрощение процесса проектирования, оформления технической документации, монтажа и контроля основных параметров, расширение фронта, сокращение времени, стоимости и повышение качества выполнения работ на всех этапах проектирования, постройки и эксплуатации летательного аппарата. Использование хорошо разработанной методики позволяет снизить требования к квалификации проектировщиков.

В процессе проектирования электрических систем летательных аппаратов разрабатывается следующая техническая документация:

1. Принципиальные электрические схемы.
2. Полумонтажные электрические схемы.
3. Монтажные электрические схемы.
4. Фидерные электрические схемы.
5. Конструктивные чертежи.

За основу системы * оформления технической документации рационально принять принцип разбивки всего электрооборудования по отсекам и функциям, как показано в табл. 2. 1.

Таблица 2.1

Разбивка электрооборудования по функциональным признакам

Но- мер	Ин- декс	Наименование	Но- мер	Ин- декс	Наименование
1	Э	Энергосистема постоянного тока	9	А	Автоматическое управление (автопилоты)
2	ЭП	Энергосистема переменного тока	10	О	Освещение
3	ВБ	Вооружение бомбовое	11	С	Сигнализация
4	ВС	Вооружение стрелковое	12	Ф	Фотооборудование
5	Д	Двигательные системы	13	Р	Радиооборудование (питание)
6	У	Управление летательным аппаратом	14	Б	Бытовое оборудование
7	Т	Тепловые системы	15	Г	Топливная система
8	П	Приборное оборудование	16	Н	Противопожарная система (нейтрализация)
			17	З	Запуск двигателей
			18	Ш	Шасси

Каждая функция включает одну или несколько электрических систем, предназначенных для выполнения определенных задач одного и того же назначения.

Принципиальные электросхемы выполняются отдельно для каждой функции с указанием связей между различными функциями.

* Разработана автором в 1950—1953 гг.

ми, если таковые существуют. Таким образом исключается необходимость составления общей громоздкой схемы всего электрооборудования летательного аппарата.

В зависимости от типа летательного аппарата некоторые функции могут отсутствовать. В этом случае их номера остаются свободными, а номера остальных функций сохраняются согласно данной разбивке. С появлением новых функций последним присваиваются последующие свободные номера. Номер определенной функции должен сохраняться для всех видов летательных аппаратов.

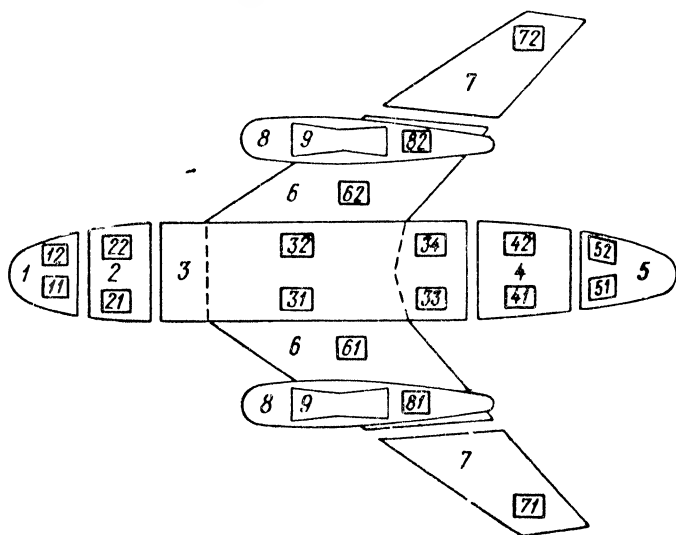


Рис. 2. 1. Схема нумерации отсеков и пультов самолета

Каждой функции присваивается также буквенный индекс, представляющий начальные буквы ее названия. Например: Э — энергосистема постоянного тока, П — приборы, Ф — фотооборудование и т. д.

Функциональный принцип разбивки электрооборудования положен в основу построения и нумерации принципиальных электросхем, агрегатов, аппаратуры и проводов.

По конструктивным, технологическим и эксплуатационным соображениям летательный аппарат разбивается на несколько отсеков. Так, например, самолет разбит на девять отсеков: 1 — кабина летчиков; 2 — кабина штурмана; 3 — средний отсек; 4 — технический отсек; 5 — хвостовой отсек; 6 — центроплан; 7 — крыло; 8 — гондолы двигателей и 9 — двигатели.

Пультам, приборным доскам, распределительным устройствам и прочим щиткам, расположенным в отсеках летательного аппарата, присваиваются номера, в которых первая цифра указывает номер отсека, а вторая — порядковый номер пульта в этом отсеке.

Например, с 11 по 19 — номера пультов в кабине летчиков. Пультам, расположенным слева от оси самолета, присваиваются нечетные номера, а расположенным справа — четные.

Схема разбивки электрооборудования по отсекам и пультам представлена на рис. 2. 1.

Разбивка летательного аппарата на отсеки и нумерация пультов соответственно отсекам положена в основу нумерации полумонтажных и монтажных схем, жгутов, электрических разъемов и чертежей конструктивных установок.

§ 2. СИСТЕМА НУМЕРАЦИИ ПРИНЦИПИАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОСХЕМ, АГРЕГАТОВ И ПРОВОДОВ

В основу нумерации принципиальных электросхем, агрегатов и проводов положен функциональный признак.

Первые две цифры обозначают номер группы. Согласно нормам МАП группе электрооборудования присваивается номер «72». Вторые две цифры обозначают номер подгруппы.

Принципиальным электросхемам присваивается подгруппа «00».

В нумерации принципиальных электросхем цифры после тире указывают порядковый номер функции, например:

7200-1 — принципиальная схема энергосистемы постоянного тока;

7200-2 — принципиальная схема энергосистемы переменного тока и т. д.

Нумерация фидерных электросхем определяется назначением фидера и совпадает с номером соответствующей принципиальной схемы. Но так как принципиальная схема функции состоит из нескольких фидеров, то появляется дополнительный индекс, определяющий порядковый номер фидера в данной принципиальной схеме, например:

7200-1-1 — фидерная схема генератора постоянного тока;

7200-1-2 — фидерная схема аккумулятора и т. д.

Нумерация графиков нагрузок дается по функциям в соответствии с родом тока:

7200-21 — график нагрузок постоянного тока;

7200-22 — график нагрузок переменного тока.

Нумерация расчетов электрических систем дается по функциям в соответствии с родом тока:

7200-31 — расчеты электрических систем постоянного тока;

7200-32 — расчеты электрических систем переменного тока.

Нумерация электроагрегатов и аппаратуры выполняется по функциям в соответствии с нумерацией принципиальных электросхем. Первая цифра или две первых цифры указывают номер функции, а последующие — порядковый номер агрегата в данной функции. Агрегатам, расположенным слева от оси ле-

гательного аппарата, присваиваются нечетные номера, справа — четные, например:

101 — левый генератор постоянного тока;

1402 — правый кипятильник и т. д.

Каждая функция имеет определенный интервал номеров. Например, с 100 по 199 — агрегаты энергосистемы постоянного тока.

Если интервал в 100 номеров недостаточен, то дополнительные номера берутся в том же интервале с нулем впереди, например: 0125.

Агрегат, устанавливаемый в отсеке или на пульте, соответственно имеет перед номером агрегата номер отсека или пульты. Например: 9—101 — левый генератор постоянного тока, установленный на двигателе; 22—118 — выключатель правого генератора, установленный на распределительном устройстве штурмана. Номер отсека или пульта может писаться под чертой номера агрегата.

Например: $\frac{101}{9}$; $\frac{118}{22}$ и т. д. Номера агрегатов наносятся на конструктивных чертежах и соответственно на летательном аппарате в местах, удобных для обозрения.

Описанная выше система нумерации электроагрегатов проста, наглядна, легко запоминается, удобна при проектировании, монтаже и эксплуатации.

Провода маркируются буквенно-цифровыми индексами, в которых первые буквы обозначают функцию.

Например: О — освещение; С — сигнализация и т. д.

Вторые буквы, а иногда и третьи, обозначают название агрегата в данной функции. Цифровой индекс после букв показывает порядковый номер провода в данном агрегате. Например:

ЭГ1 — провод левого генератора.

Нечетные цифровые номера присваиваются проводам агрегатов, расположенных слева от оси симметрии летательного аппарата или впереди, если агрегат стоит по оси летательного аппарата.

Четные цифровые номера присваиваются проводам агрегатов, расположенных справа от оси л. а. или ближе к хвостовой части, если агрегат стоит по оси л. а.

Цифровой индекс сохраняется неизменным от агрегата к агрегату, включая случаи, когда по длине провода имеются клеммные или штепсельные разъемы.

Провода, входящие в агрегат и выходящие из него, должны иметь разный цифровой индекс. Это относится и ко всей коммутационной аппаратуре (выключателям, переключателям, кнопкам и т. п.).

При подключении проводов к штепсельным разъемам номера проводов должны располагаться соответственно по возрастающим номерам клемм, как показано на рис. 2. 2.

Если в данной функции от одного фидера питаются потребители разных назначений, то допускаются изменения буквенного индекса после выключателя соответственно потребителю.

В основу маркировки минусовых проводов положен номер агрегата и буква М. Например: М592 — минусовой провод агрегата № 592.

Если по условиям монтажа минусовые провода собираются на минусовую шину в коробке, то указанная маркировка сохраняется.

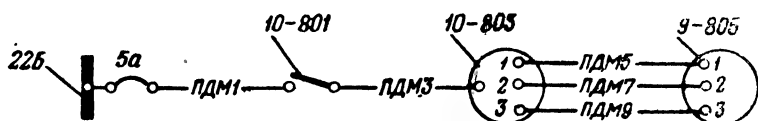


Рис. 2.2. Схема подключения проводов к агрегатам

Провод, идущий от минусовой шинки на массу, маркируется «МО» — масса общая. Маркировка минусовых проводов показана на рис. 2.3.

Если в коробке имеются несколько минусовых шин и от каждой выводится самостоятельный общий минус, то к индексу «МО» добавляются цифры МО1; МО2 и т. д.

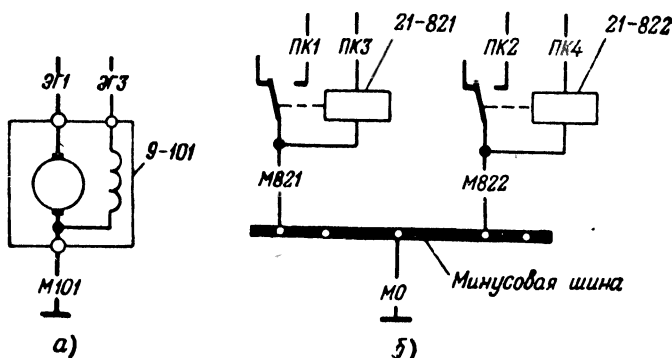


Рис. 2.3. Маркировка минусовых проводов:

а — агрегата; б — общая

Вся система нумерации принципиальных схем, агрегатов, проводов, фидерных схем, графиков нагрузок и расчетов проводов приведена в табл. 2.2.

§ 3. СИСТЕМА НУМЕРАЦИИ ПОЛУМОНТАЖНЫХ СХЕМ, МОНТАЖНЫХ СХЕМ И КОНСТРУКТИВНЫХ ЧЕРТЕЖЕЙ

В основу нумерации полумонтажных и монтажных схем и конструктивных чертежей положена разбивка летательного аппарата на отсеки. Первые две цифры означают номер группы. Группе электрооборудования присваивается номер «72». Вторые две цифры обозначают номер подгруппы.

Полумонтажным схемам присваивается номер подгруппы «00». Номер отсека отмечается второй цифрой после тире. Первая цифра «1» после черточки — условный индекс полумонтажных схем, например:

7200-110 — полумонтажная схема электрооборудования кабины летчиков;

Спецификации проводов составляются в соответствии с полумонтажными схемами. Условным индексом спецификаций проводов является первая цифра «3» после черточки, например:

7200-310 — спецификация проводов кабины летчиков;

7200-320 — спецификация проводов кабины штурмана и т. д.

Фотосхемы — полумонтажные схемы пультов, изготавливающиеся на фотобумаге и размещающиеся непосредственно в конструкции на удобных для обозрения местах.

В основу нумерации фотосхем положена нумерация пультов.

Первая цифра «1» после черточки — условный индекс, присущий полумонтажным схемам. Вторая и третья цифры соответствуют номеру пульта, например:

7200-121 — фотосхема левого распределительного устройства штурмана;

7200-182 — фотосхема распределительного устройства правого отсека гондолы двигателя.

Жгутам присваиваются буквенно-цифровые индексы, в которых буквы указывают наименование отсека, а цифры — порядковый номер жгута в данном отсеке. Жгуты, переходящие из одного отсека в другой без разъема на стыке отсеков, имеют двойной буквенный индекс, соответствующий наименованиям отсеков. Жгутам, расположенным слева от оси летательного аппарата, присваиваются нечетные номера, а расположенным справа — четные, например:

Л1 — левый жгут кабины летчика;

ЛП12 — правый жгут кабины летчика-штурмана и т. д.

Номер жгута наносится специальной краской на изоляционных трубах, которые надеваются на жгут по длине в нескольких местах, удобных для обозрения.

Разъемам присваиваются двойные цифровые индексы, в которых цифры до тире указывают номер отсека или пульта, а цифры после тире — порядковый номер разъема в данном отсеке или пульте.

Например: 1—3 — левый разъем № 3 кабины летчиков;

Схема нумерации жгутов и разъемов представлена на рис. 2.4.

Монтажным схемам и конструктивным установкам присваивается подгруппа, соответствующая номеру отсека (третья цифра), а конструктивным чертежам пультов — соответствующая номеру пульта (третья и четвертая цифры).

Условным индексом монтажных схем и конструктивных чертежей пультов является цифра «0» после черточки.

Система нумерации по функциям

№ функции	Наименование функции	№ принципиальных схем	Номера агрегатов		Индекс проводов	№ фидерных схем	№ графиков нагрузок	№ расчетов
			основные	дополнительные				
1	Принципиальная схема энергосистемы постоянного тока	7200-1	100 ÷ 199	0100 ÷ 0199	Э	7200-1-1 7200-1-2	7200-21	7200-31
2	Принципиальная схема энергосистемы переменного тока	7200-2	200 ÷ 299	0200 ÷ 0299	ЭП	7200-2-1 7200-2-2	7200-22	7200-32
3	Принципиальная схема бомбового вооружения	7200-3	300 ÷ 399	0300 ÷ 0399	ВВ	7200-3-1 7200-3-2		
4	Принципиальная схема стрелкового вооружения	7200-4	400 ÷ 499	0400 ÷ 0499	ВС	7200-4-1 7200-4-2		
5	Принципиальная схема двигательных систем	7200-5	500 ÷ 599	0500 ÷ 0599	Д	7200-5-1		
6	Принципиальная схема управления самолетов	7200-6	600 ÷ 699	0600 ÷ 0699	У	7200-6-1 7200-6-2		

7	Принципиальная схема тепловых систем	7200-7	700 ÷ 799	0700 ÷ 0799	Т	7200-7-1 7200-7-2
8	Принципиальная схема приборов	7200-8	800 ÷ 899	0800 ÷ 0899	П	7200-8-1 7200-8-2
9	Принципиальная схема автоматических систем (автопилот)	7200-9	900 ÷ 999	0900 ÷ 0999	А	7200-9-1 7200-9-2
10	Принципиальная схема освещения	7200-10	1000 ÷ 1099	01000 ÷ 01099	О	7200-10-1 7200-10-2
11	Принципиальная схема сигнализации	7200-11	1100 ÷ 1199	01100 ÷ 01199	С	7200-11-1 7200-11-2
12	Принципиальная схема фотооборудования	7200-12	1200 ÷ 1299	01200 ÷ 01299	Ф	7200-12-1 7200-12-2
13	Принципиальная схема питания радиооборудования	7200-13	1300 ÷ 1399	01300 ÷ 01399	Р	7200-13-1 7200-13-2
14	Принципиальная схема бытового оборудования	7200-14	1400 ÷ 1499	01400 ÷ 01499	Б	7200-14-1 7200-14-2

№ функции	Наименование функции	№ принципиальных схем	Номер агрегатов		Индекс про- вод	№ фидерных схем	№ графиков на- грузок	№ рас- четов
			основные	дополни- тельные				
15	Принципиальная схема топливной системы (горючее)	7200-15	1500 ÷ 1599	01500 ÷ 01599	Г	7200-15-1		
16	Принципиальная схема противопожарной системы (нейтрализация)	7200-16	1600 ÷ 1699	01600 ÷ 01699	Н	7200-16-1		
17	Принципиальная схема запуска	7200-17	1700 ÷ 1799	01700 ÷ 01799	З	7200-17-1		
18	Принципиальная схема шасси	7200-18	1800 ÷ 1899	01800 ÷ 01899	Ш	7200-18-1		

Примечания. 1. Если какая-либо функция на данном летательном аппарате отсутствует, то соответствующий номер остается свободным.

2. Распределительным шинам присваиваются буквенные индексы: А, Б и В — шинам постоянного тока и Д, Е и Ж — шинам переменного тока.

3. Для испытательной аппаратуры сохраняется общий порядок нумерации схем, агрегатов, проводов и распределительных шин с добавлением буквы И, например:

7200-ИИ — принципиальная схема энергосистемы постоянного тока испытательной аппаратуры;

801И — прибор испытательной аппаратуры и т. п.

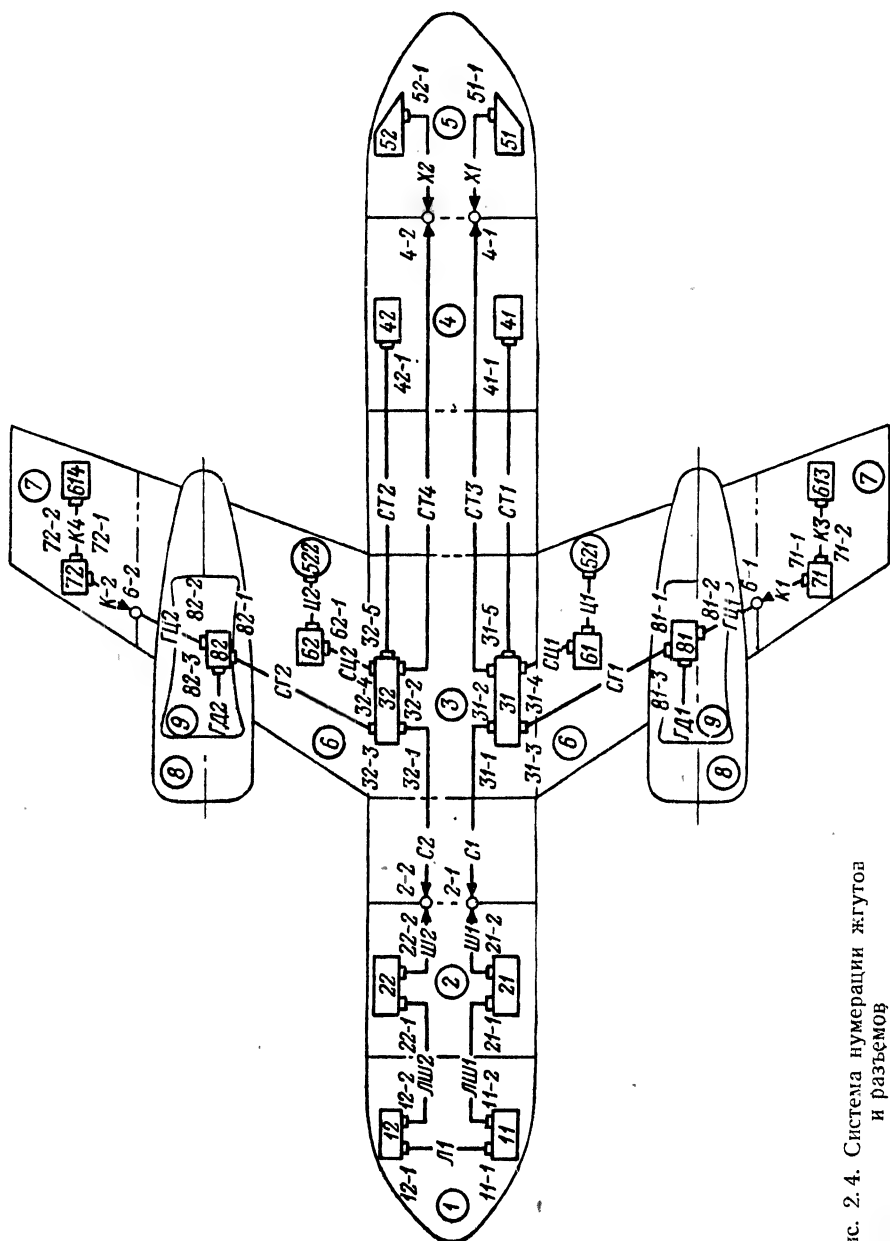


Рис. 2. 4. Система нумерации жгутов и разъемов

Отсеки

№ отсека	Наименование отсека	№ полумонтажной схемы	№ спецификации проводов	№ жгутов	№ разъемов	№ монтажной схемы	№ конструктивных установок
1	Кабина летчика	7200-110	7200-310	Л1; Л2;	1—1; 1—2	7210-0	7210—100; 101; 102; ...
2	Кабина штурмана	7200-120	7200-320	Ш1; Ш2	2—1; 2—2	7220-0	7220—100; 101; 102; ...
3	Средний отсек	7200-130	7200-330	С1; С2	3—1; 3—2	7230-0	7230—100; 101; 102; ...
4	Технический отсек	7200-140	7200-340	Т1; Т2	4—1; 4—2	7240-0	7240—100; 101; 102; ...
5	Хвостовой отсек	7200-150	7200-350	Х1; Х2	5—1; 5—2	7250-0	7250—100; 101; 102; ...
6	Центроплан	7200-160	7200-360	Ц1; Ц2	6—1; 6—2	7260-0	7260—100; 101; 102; ...
7	Крыло	7200-170	7200-370	К1; К2	7—1; 7—2	7270-0	7270—100; 101; 102; ...
8	Гондола двигателя	7200-180	7200-380	Г1; Г2	8—1; 8—2	7280-0	7280—100; 101; 102; ...
9	Двигатели	7200-190	7200-390	Д1; Д2	9—1; 9—2	7290-0	7290—100; 101; 102; ...

Примечания. 1. Если какой-либо отсек на данном летательном аппарате отсутствует, то соответствующие ему номера остаются свободными.

2. Если в каком-либо отсеке номеров пультов недостаточно, то вводятся дополнительные номера с нулевым индексом: 011; 012; Соответственно получают нумерацию фотосхемы: 7200-0111; 7200-0112; Дополнительные номера рекомендуется присваивать разветвительным коробкам, щиткам и панелям.

3. В отдельные конструктивные подгруппы следует выделять только пульта, имеющие самостоятельный номер и значительный объем конструктивных чертежей.

ции по отсекам

Пульты				
№ пультов	№ фотосхем	№ разъемов	№ фотомонтажных схем	№ конструктивных чертежей
11 12 19	7200—111 7200—112 7200—119	11—1; 11—2 12—1; 12—2 19—1; 19—2	7210—11 7210—12 7210—19	7211—0 7212—0 7219—0
21 22 29	7200—121 7200—122 7200—129	21—1; 21—2 22—1; 22—2 29—1; 29—2	7220—21 7220—22 7220—29	7221—0 7222—0 7229—0
31 32 39	7200—131 7200—132 7200—139	31—1; 31—2 32—1; 32—2 39—1; 39—2	7230—31 7230—32 7230—39	7231—0 7232—0 7239—0
41 42 49	7200—141 7200—142 7200—149	41—1; 41—2 42—1; 42—2 49—1; 49—2	7240—41 7240—42 7240—49	7241—0 7242—0 7249—0
51 52 59	7200—151 7200—152 7200—159	51—1; 51—2 52—1; 52—2 59—1; 59—2	7250—51 7250—52 7250—59	7251—0 7252—0 7259—0
61 62 69	7200—161 7200—162 7200—169	61—1; 61—2 62—1; 62—2 69—1; 69—2	7260—61 7260—62 7260—69	7261—0 7262—0 7269—0
71 72 79	7200—171 7200—172 7200—179	71—1; 71—2 72—1; 72—2 79—1; 79—2	7270—71 7270—72 7270—79	7271—0 7272—0 7279—0
81 82 89	7200—181 7200—182 7200—189	81—1; 81—2 82—1; 82—2 89—1; 89—2	7280—81 7280—82 7280—89	7281—0 7282—0 7289—0
91 92 ...	7200—191 7200—192 ...	91—1; 91—2 99—1; 99—2 ...	7290—91 7290—92 ...	7291—0 7292—0 ...

Мелкие конструкции разветвительных коробок, щитков, панелей и т. п. оформлять по подгруппам соответствующих отсеков.

4. Для жгутов, соединяющих два и более отсеков, буквенный индекс дается соответственно наименованиям отсеков.

5. Для испытательной аппаратуры сохраняется общий порядок нумерации чертежей, отсеков, пультов, разъемов и жгутов с добавлением буквы И.

Например: 7200-110И—полумонтажная схема испытательной аппаратуры кабины летчика; К12И — жгут испытательной аппаратуры правого крыла и т. п.

В условных обозначениях фотомонтажных схем пультов цифры после тире означают номера пультов.

Примеры:

7210-0 — монтажная схема электрооборудования кабины летчика;

7221-0 — конструктивный чертеж левого распределительного устройства кабины штурмана;

7210-11, 12...19 — фотомонтажные схемы пультов 11, 12...19 кабины летчика.

Конструкции общего назначения — розетки аэродромного питания, контейнеры аккумуляторов, патроны для предохранителей и т. п. — могут переходить с одного типа летательного аппарата на другой без изменений. При этом изменяются лишь места их установки по отсекам в зависимости от типа или модификации летательного аппарата. Подобные конструкции следует выделять в специальные подгруппы, не связанные с определенным отсеком.

Полная система нумерации чертежей по отсекам приведена в табл. 2.3.

§ 4. МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ПРИНЦИПИАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОСХЕМ

Принципиальные схемы отражают электрические связи между элементами и раскрывают принципы взаимодействия отдельных элементов электрических систем и всего комплекса электрооборудования.

Принципиальные схемы являются основным рабочим документом при проектировании, монтаже и эксплуатации электрооборудования с момента возникновения эскизного проекта до окончания срока службы серийных л. а., поэтому они должны содержать все основные элементы электроагрегатов, коммутационной аппаратуры и электрической сети, обладая при этом простотой и ясностью изображений.

На основании принципиальных схем разрабатываются полумонтажные, фото- и монтажные схемы, чертежи конструктивных установок, строятся графики нагрузок и производятся необходимые расчеты.

Для некоторых типов л. а. принципиальные схемы используются в течение 15—20 лет. За этот период с ними работают десятки тысяч человек различной квалификации и уровня знаний, начиная с рабочего и кончая высококвалифицированными инженерами.

Рассмотрим возможные пути систематизации в разработке принципиальных электросхем.

В основу систематизации положен принцип разбивки электрооборудования по функциям. Для каждой функции разрабатывается отдельная принципиальная схема, которой присваивается определенный номер с соответствующей нумерацией агрегатов и проводов.

На принципиальных схемах электроагрегаты и элементы электрической сети изображаются условно, а электрические соединения между ними показываются линиями, которые по возможности должны иметь минимум пересечений и изломов. Силовые цепи изображаются жирными линиями, электроагрегаты — условным контуром из тонких линий, внутри которого показываются входящие в агрегат элементы. На границе контура наносятся номера клемм (для агрегатов с несколькими разъемами и номера разъемов), к которым подключаются внешние провода.

Содержание внутренних элементов достаточно давать для одного из однотипных повторяющихся агрегатов, а для остальных наносить только внешний контур и номера клемм.

Для электроагрегатов, имеющих сложную схему, изображение внутренних элементов целесообразно давать упрощенно, обеспечивая при этом простоту понимания электрической системы. В отдельных случаях внутренние элементы изображать нецелесообразно, следует наносить только контур с нумерацией клемм и краткими надписями, указывающими их назначение.

Условное изображение защиты следует выполнять в соответствии с ее типом. На условном контуре проставляется номинальный ток защиты, а рядом — номинальный ток потребителя в длительном и кратковременном режимах работы, время кратковременного режима работы и расстояние до наиболее удаленной точки фидера.

Это позволяет легко составить график нагрузок, выбрать мощность источников питания, тип защитной аппаратуры и определить сечения проводов.

Если защита выполняет одновременно и роль выключателя, то половина ее условного обозначения штрихуется или показывается в разомкнутом положении.

На схемах около условных изображений цепей проставляются сечения соответствующих им проводов. Если сечение проводов постоянно для всех участков фидера, то оно проставляется на ближайшем около защиты участке.

Если сечение проводов изменяется по участкам схемы, то оно проставляется на всех участках схемы.

Экранированные провода отмечаются крестиками.

Около условного обозначения защиты должно быть нанесено наименование фидера.

Например: «Триммер элерона».

В тех случаях, когда работа системы зависит от ее исходного положения, около концевых выключателей, реле, электроагрегатов и т. п. необходимо делать соответствующие пояснения в схемах. Отсутствие таких пояснений (надписей) затрудняет чтение схемы и приводит к неправильному их пониманию и эксплуатации.

Описание желательно помещать под соответствующим фидером на схеме.

В спецификации агрегаты перечисляются по возрастающим номерам, как указано в табл. 2. 4.

Таблица 2.4

№ отсека или пульт	№ агрегата	Наименование агрегата	Тип	№ установочного чертежа	Примечание
9	101	Левый генератор	ГСП-9000	7290-20	$I_{\text{ном}}=400 \text{ а}$
9	102	Правый генератор	ГСП-9000	7290-20	
81	103	Реле обратного тока левого генератора	ДМР-400А	7281-0	
82	104	Реле обратного тока правого генератора	ДМР-400А	7282-0	
22	105	Выключатель левого генератора	2В-45	7222-0	
22	106	Выключатель правого генератора	2В-45	7222-0	

Такая форма спецификации дает возможность легко определять: функциональность, тип агрегата, номера отсека, пульт и установочного чертежа.

Свободные номера также заносятся в таблицу и используются при установке дополнительных агрегатов.

Наименование агрегатов должно быть кратким, четким и соответствовать трафаретам на пультах и щитках.

Например: выключатель «Свет лев. фары».

В принципиальной схеме дается дополнительная спецификация основных параметров готовых изделий, имеющих важное значение при решении ряда вопросов проектирования и эксплуатации электрооборудования. Форма спецификации приведена в табл. 2.5.

Таблица 2.5

№ по пор.	Наименование агрегата	Тип	Количество		P вт	U в	I а	Примечание
			шт.	Вес кг				
1	Генератор	ГСП-9000	2	24	9000	28,5	300	400 а—1 мин 600 а—10 сек
2	Реле обратного тока	ДМР-400А	2	1,85		28,5	400	Разрывная способность 2000 а
3	Регулятор напряжения	Р-25АМ	2	1,75		28,5±1,5		

Составление спецификаций не требует дополнительных затрат времени, так как при разработке принципиальных схем значительное время отводится для знакомства с принципами действия и основными параметрами готовых изделий.

На принципиальной схеме энергетической системы изображаются распределительные шины с защитой и наименованием фидеров потребителей по функциям. Это позволяет ясно и четко представить энергетическую систему л. а. со всеми распределительными устройствами и расположением потребителей (см. рис. 1 приложения).

При отработке принципиальных схем для серийных л. а. следует ввести индексы разъемов и номера клемм, через которые проходят провода, как показано на рис. 2.5.

При наличии индексов разъемов с указанием номеров клемм значительно упрощается контроль электрических систем на л. а., сокращается время контроля и отпадает необходимость при эксплуатации в полумонтажных схемах, контролировать по которым значительно сложнее, чем по указанным принципиальным схемам.

Выполнение принципиальных схем по функциям имеет следующие достоинства:

1. Упрощает проектирование, монтаж и эксплуатацию систем. Имеется возможность без дополнительной затраты времени использовать их для эскизного и рабочего проектов и для всевозможных согласований в процессе проектирования и отработки электрооборудования л. а.

2. Расширяет фронт работ по проектированию.
3. Сокращает время проектирования.
4. Обеспечивает более глубокую проработку систем.
5. Дает возможность использовать менее квалифицированных конструкторов без ущерба для качества проектирования.
6. Обеспечивает возможность существенной модификации электрооборудования л. а. в исключительно короткие сроки.
7. Значительно сокращает время на изучение схем при монтаже и эксплуатации л. а.
8. Упрощает замену изношенных кáлек.

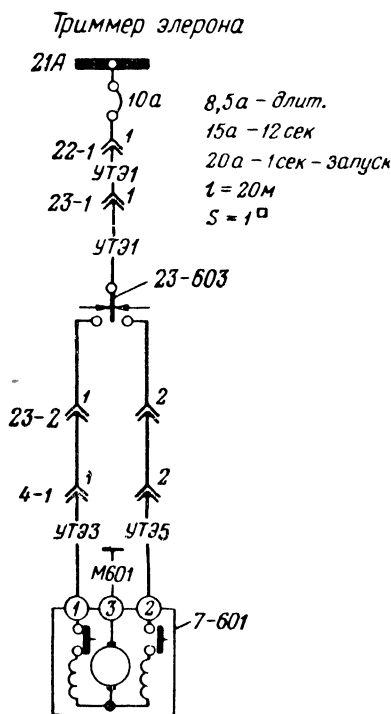


Рис. 2.5. Принципиальная схема с указанием пути следования проводов

9. Уменьшает вероятность принципиальных и формальных ошибок в электрических системах.

10. Упрощает подготовку и сокращает время для оформления заказов на готовые изделия.

11. Дает возможность легко определить вес готовых изделий по функциям, потребляемые мощности и другие параметры.

§ 5. МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ПОЛУМОНТАЖНЫХ ЭЛЕКТРОСХЕМ

Полумонтажные схемы отражают действительное расположение электрических агрегатов на летательном аппарате и их внешние электрические связи.

Полумонтажные схемы разрабатывают на основании принципиальных схем и выполняются по отсекам, в соответствии с которыми им присваивается номер.

На полумонтажной схеме наносится условный контур отсека л. а., в котором изображаются агрегаты, пульта и разъемы. Места их расположения на схеме должны приближаться к действительным местам их установки на летательном аппарате.

В условных изображениях разъемов наносятся номера клемм и отмечаются вилка и гнездо. Гнездо должно размещаться со стороны токонесущей части.

Провода, соединяющие между собою отдельные элементы электрооборудования, собираются в жгуты, обеспечивая при этом наиболее рациональные коммуникации.

В зависимости от характера монтажа (открытый, в экране, в трубе) жгуты имеют условные обозначения.

Схематическое расположение жгутов следует приближать к реальным условиям монтажа, избегая при этом излишних пересечений, что значительно упрощает чтение схем и выполнение дальнейших работ.

При разработке полумонтажных схем должны выполняться следующие конструктивные, технологические и эксплуатационные требования:

1. Рациональная компоновка агрегатов, обеспечивающая минимальный вес, максимальную надежность и удобство эксплуатации.

2. Технологичность изготовления агрегатов, жгутов и их монтажа на самолете.

3. Минимальное количество разъемов.

4. Минимальная длина коммуникаций проводов.

5. Минимальное количество ответвлений жгутов.

6. Легкосъемность жгутов, пультов и агрегатов.

7. Обеспечение эксплуатационных подходов для осмотра аппаратуры.

8. Ограниченное применение разветвительных коробок, служащих для технологической развязки.

9. Простота изображения схем.

Спецификация агрегатов к полумонтажной схеме составляется по форме принципиальных схем. В начале спецификации в порядке возрастающих номеров указываются пульта данного отсека. Далее по возрастающим номерам с соблюдением порядка функций дается спецификация агрегатов. В конце спецификации так же в порядке возрастающих номеров перечисляются разъемы, устанавливаемые в данном отсеке. Такое выполнение спецификации упрощает чтение полумонтажной схемы и ее согласование с принципиальными схемами и конструктивными чертежами.

Для полумонтажной схемы каждого отсека составляется спецификация проводов с указанием номеров агрегатов, пультов, разъемов, длин, типа и сечений проводов.

Для снижения веса проводов агрегаты следует запитывать от распределительных устройств, расположенных в непосредственной близости от них.

Из кабин экипажа рекомендуется запитывать агрегаты, установленные в этих кабинах, и цепи управления агрегатов, расположенных в других отсеках.

В процессе разработки полумонтажных схем необходимо стремиться к рациональной компоновке элементов электрооборудования в отсеках и пультах с точки зрения минимального веса, простоты конструкции, технологичности, надежности и удобства эксплуатации электрооборудования л. а.

Фотосхемы разрабатываются для распределительных устройств, приборных досок, пультов, щитков, разветвительных коробок и других самолетных агрегатов и используются в процессе эксплуатации и электромонтажей.

В первом случае фотосхемы выполняются на фотобумаге или металле и устанавливаются на соответствующих агрегатах летательного аппарата. Фотосхемы должны иметь черный фон и белое изображение. Размеры фотосхем выбираются в соответствии с местом их установки, но так, чтобы обеспечить ясность изображения и удобство чтения. Расположение агрегатов на фотосхеме должно соответствовать их действительному расположению на пультах, что значительно упрощает эксплуатацию электрооборудования.

Во втором случае фотосхемы используются при проведении электромонтажных работ на верстаках, для чего в них дается спецификация проводов с указанием типа, длины и сечений.

Сечения проводов внутри пультов должны соответствовать сечению подходящих проводов.

Однако для снижения веса и компактности электромонтажей внутри пультов целесообразно применять провода без хлорвиниловой оплетки с меньшими сечениями, в сравнении с подходящими проводами, не нарушая при этом допустимых величин токовой нагрузки. Это относится в первую очередь к проводам, сечение которых выбирается по падению напряжения или по соображениям механической прочности.

Если большое количество проводов имеет одинаковый тип и сечение, то для опытных летательных аппаратов достаточно оговорить это в примечаниях.

§ 6. МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ МОНТАЖНЫХ ЭЛЕКТРОСХЕМ

Монтажные схемы являются основным техническим документом при монтаже электрической сети летательного аппарата и одновременно являются схемами коммуникаций проводов и размещения оборудования, перечнем установочных чертежей, весовой сводкой и, наконец, компоновкой электрооборудования данного отсека.

Для сокращения времени на монтажи, уменьшения возможных ошибок, повышения качества монтажа и снижения веса, монтажные схемы следует разрабатывать в процессе опытного проектирования и уточнять при отработке опытного образца.

Рассмотрим наиболее рациональную систему оформления монтажных схем.

Монтажные схемы обычно выполняются по отсекам, т. е. изображаются внутри контура каркаса соответствующего отсека летательного аппарата в масштабе, как правило, 1 : 5 или 1 : 10.

В том же масштабе на схему наносятся конструктивные детали коробов, панелей, кронштейнов и других элементов, необходимых для монтажа, а также наносятся все электрические агрегаты, пульты, щитки и разъемы данного отсека с указанием номеров установочных чертежей и соответствующих номеров агрегатов и разъемов по полумонтажной схеме. Если агрегаты устанавливаются на пульте, то дается только номер пульта.

Затем наносятся все жгуты в соответствии с их действительным положением на летательном аппарате и с указанием нумерации. Показываются детали и нормали крепления жгутов.

Для упрощения выполнения монтажей жгутов отсеков фюзеляжа и гондол в монтажных схемах следует давать основную плановую проекцию и виды на правый и левый борт с внутренней стороны.

В местах перехода жгутов с борта на борт для уяснения отдельных узлов крепления и прокладки жгутов следует на общем чертеже давать виды и узлы соответствующих мест.

На монтажных схемах, выпускаемых для опытных самолетов, детально прорабатываются проходы и крепления жгутов на основных маршрутах.

Маршруты мелких жгутов и одиночных проводов наносятся ориентировочно и уточняются при отработке монтажей на опытном л. а.

При уточнении маршрутов и деталей креплений жгутов необходимо широко использовать фотографирование и оформление фотоальбомов в виде чертежей.

Фотоальбомы передаются на серийные заводы при запуске изделия в серию.

Внутренние монтажи пультов и щитков не показываются, а даются только номера установочных чертежей и номера чертежей фотомонтажей.

Выпуск фотоальбомов (чертежей) дает хорошее представление о деталях выполнения монтажа без затраты конструкторского времени. Этот метод детализации монтажей следует считать наиболее маневренным и экономичным.

Спецификация к монтажным схемам составляется по форме, указанной в табл. 2.6. В спецификацию входят все электроагрегаты, устанавливаемые по группе 72 и другим группам, а также жгуты и нормали крепления. Спецификация позволяет легко определять: номера электрических агрегатов, жгутов и установочных чертежей, расположение агрегата на летательном аппарате, вес отдельных установок и вес электрооборудования данного отсека.

Таблица 2.6

№ агрегатов, пультов разъемов, жгутов	№ чертежа	Наименование установки	Количество	Материал	Вес кг	Примечание
...	...	...	...	...	...	...
П1	—	Жгут	1	Сборочный	1,6	В экране
...	...	...	...	...	...	...
11	7211-0	Левое РУ шилота	1	Установочный	25,3	
105	7210-100	Регулятор напряжения	1	То же	2,1	

Спецификацию располагают в порядке возрастания номеров.

Существующая практика помещения типовых заделок проводов, разъемов, жгутов и других типовых элементов монтажа на монтажных схемах вызывает повторение однотипных узлов, дополнительные ошибки и значительные затраты времени, поэтому при разработке монтажных схем следует широко использовать нормали типовых монтажных элементов и узлов, применяемых для различных типов летательных аппаратов. Нормали должны систематически пополняться при появлении новых типовых заделок.

Выполнение монтажных схем в процессе проектирования и уточнение их при монтаже опытных образцов путем фотографирования сокращает общие затраты времени на проектирование и монтажи, снижает вес и увеличивает надежность электрических систем.

Фотомонтажные схемы. Практика разработки и выпуска монтажных схем для пультов, щитков, приборных досок, РУ

и других электроагрегатов связана с большими трудностями и значительными затратами времени. Даже на серийных заводах оформление чертежей отстает от действительных изменений монтажей. Для опытных образцов разработка таких чертежей практически невозможна. Поэтому весьма целесообразно применять фотомонтажные схемы, которые обеспечивают высокое качество монтажей при минимальной затрате времени на проектирование.

Монтаж пультов, щитков и других электроагрегатов на опытном заводе обычно выполняется высококвалифицированными рабочими — электриками. Этот монтаж тщательно отрабатывается с участием конструктора и фотографируется с обеспечением хорошей видимости всех дегалей. Фотографиям присваивается чертежный номер. В спецификацию вносятся необходимые детали и нормы крепления.

Чертеж фотомонтажной схемы является основным техническим документом при монтаже опытных и серийных летательных аппаратов. Фотомонтажи обновляются по мере уточнения конструкции.

Для подключения проводов при выполнении монтажей используется соответствующая фотосхема.

§ 7. МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ФИДЕРНЫХ ЭЛЕКТРОСХЕМ

Насыщенность современных летательных аппаратов агрегатами электрооборудования вызывает необходимость создания фидерных схем, упрощающих ориентировку в электрических системах при эксплуатации (проверка, ремонт и устранение дефектов), анализе надежности и определении веса элементов фидера.

Фидерные схемы составляются для отдельных потребителей или группы потребителей, имеющих общее целевое назначение, один общий аппарат защиты или несколько аппаратов защиты, обслуживающих группу.

Фидерные схемы являются дополнительным подразделением принципиальных схем каждой функции с добавлением полумонтажной и монтажной части. Некоторые принципиальные схемы, выполненные по функциям, полностью переходят в фидерные схемы без каких-либо дополнительных дроблений. Типовая схема приведена на рис. 2.6.

Основой для разработки фидерных схем являются принципиальные, полумонтажные и монтажные схемы, принципы построения которых полностью распространяются на фидерные схемы.

Для наибольшей наглядности и упрощения пользования фидерные схемы должны включать шесть основных элементов:

1. Принципиальную схему фидера с указанием пути следования проводов (номеров разъемов и клемм).

2. Полумонтажную схему фидера для всего контура летательного аппарата.

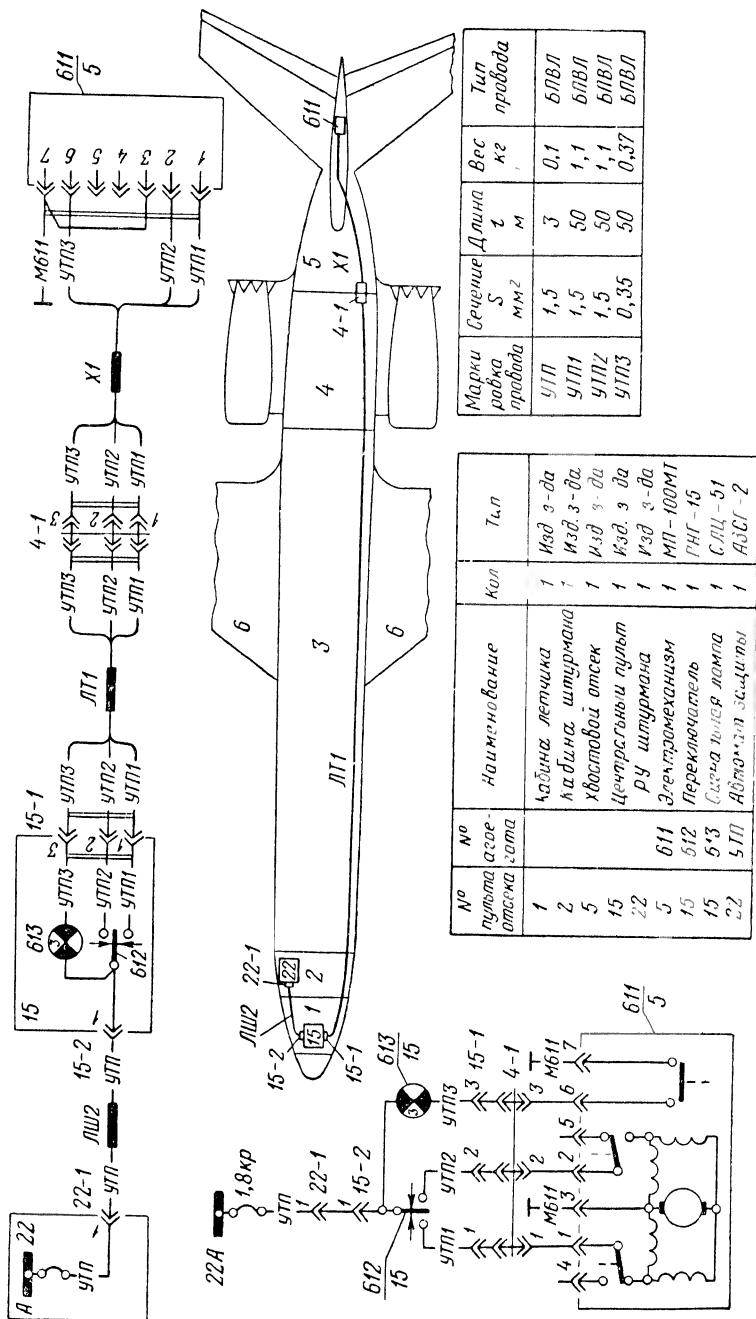


Рис. 2.6. Фидерная схема

3. Монтажную схему фидера, изображенную в изометрической или плановой проекциях для всего контура, с нанесением истинного положения агрегатов, пультов и жгутов.

4. Спецификацию проводов фидера с указанием их типа, сечения, длины и веса.

5. Спецификацию агрегатов данного фидера.

6. Краткие указания об особенностях работы элементов схемы. Фидерные схемы целесообразно разрабатывать при подготовке описания опытного летательного аппарата и в дальнейшем использовать для всех видов технической информации по электрооборудованию.

Глава III

ЭТАПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

§ 1. ЭТАПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Процесс проектирования электрических систем летательных аппаратов проходит следующие этапы:

1. Эскизное проектирование.
2. Макетирование.
3. Рабочее проектирование.
4. Монтаж опытного образца.
5. Заводские испытания опытного образца.
6. Государственные испытания опытного образца.
7. Запуск в серийное производство.

На всех этапах проектирования непрерывно проводятся теоретические и экспериментальные исследования различных вариантов электрических систем, в результате которых к моменту запуска летательного аппарата в серийное производство определяется оптимальный вариант с отработанным перспективным оборудованием.

Успешное проектирование электрических систем опытного летательного аппарата в значительной степени зависит от глубины и объема теоретических и экспериментальных исследований макетов, опытных и серийных образцов аппаратуры и систем в целом.

Для этой цели заказы перспективной аппаратуры следует проводить до начала проектирования опытного летательного аппарата с тем, чтобы ускорить ее выпуск и иметь возможность к началу проектирования выбрать оптимальную аппаратуру, обеспечивающую максимальную надежность, минимальный вес и простоту эксплуатации.

§ 2. ЭСКИЗНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

Эскизное проектирование — начальная и определяющая стадия в разработке электрических систем опытного летательного аппарата.

та. В этот период решаются принципиальные теоретические и практические задачи и разрабатывается основная техническая документация по электрооборудованию.

Техническая документация должна носить общий компоновочный характер, но с теоретическим обоснованием основных принципиальных вопросов, должна быть наглядной, простой, четкой, ясной и удобной для решения и согласования принципиальных вопросов со смежными организациями, для выполнения экспериментальных работ, макетирования и рабочего проектирования. Подробную детализацию целесообразно выполнять лишь на этапе рабочего проектирования.

Совмещение начала проектирования электрических систем с моментом зарождения эскизного проекта летательного аппарата оказывает положительное влияние на весь ход процесса проектирования и постройки л. а.

На стадии эскизного проектирования проводится всесторонняя проработка и выявление основных возможных потребителей, характера и особенностей их эксплуатации. Определяются необходимые мощности по этапам полета. Выбирается основной род тока. Проводится сравнительный анализ надежности и веса различных вариантов электрооборудования. Разрабатываются принципиальные схемы энергосистем и основных потребителей.

На основании этих проработок заказываются готовые изделия, проводятся экспериментальные работы по выявлению оптимального варианта, компоновка электрооборудования, постройка макета летательного аппарата с размещением оборудования и рабочее проектирование. Это позволяет к началу рабочего проектирования иметь определенные решения всех принципиальных вопросов по электрооборудованию летательного аппарата.

На этапе эскизного проектирования обоснованное решение должны получить следующие задачи:

1. Разработка принципиальных электросхем.
2. Выбор электроаппаратуры.
3. Выбор рода тока в первичной энергосистеме.
4. Выбор напряжения, числа фаз и частоты.
5. Выбор типа и числа источников электрической энергии.
6. Расчеты электрических параметров.
7. Разработка схем функциональных связей между системами.
8. Разработка упрощенных полумонтажных электросхем.
9. Компоновка распределительных устройств.
10. Компоновка электроаппаратуры.
11. Компоновка электрожгутов по основным магистралям.
12. Составление технических заданий на новую электроаппаратуру.

Рассмотрим краткое содержание вышеуказанных задач.

Разработка принципиальных электросхем. Эскизное проектирование должно непременно сопровождаться достаточно подробной разработкой принципиальных электрических

схем одновременно в нескольких вариантах с последующим выбором наиболее рационального из них.

Содержание и оформление их должно приближаться к электросхемам рабочего проектирования. Это упрощает процесс компоновки аппаратуры на л. а., позволяет выявить возможности оптимального решения принципиальных задач, выявить необходимость разработки новой аппаратуры, наиболее рационально выполнить конструирование, макетирование и рабочее проектирование.

Особое внимание следует уделять разработке принципиальной схемы энергосистемы, так как она определяет рациональность, характер и компоновку остального электрооборудования.

Принципиальные электросхемы должны выполняться с высокой степенью точности, так как допущенные в них ошибки повторяются многократно во всех производных чертежах.

В целях упрощения компоновки электроаппаратуры и взаимных увязок со смежными организациями целесообразно на чертежах принципиальных схем наносить упрощенные полумонтажные схемы с указанием количества и сечения проводов.

Выбор электроаппаратуры. В соответствии с принципиальными электросхемами составляется подробный перечень электрооборудования по функциональному признаку. При этом указываются тип, мощность, время работы и специальные условия эксплуатации. Перечень электрооборудования служит исходным материалом для компоновки, составления графика нагрузок и выбора мощности и типа источников энергии.

В процессе проектирования выявляются характерные особенности эксплуатации и основные технические параметры электроагрегатов, определяется оптимальный комплекс оборудования, возможности использования серийных готовых изделий и необходимость разработки новых с учетом последних достижений.

Необходимо по возможности использовать серийные электроагрегаты или опытные, прошедшие государственные испытания. Это значительно сокращает сроки проектирования и постройки летательных аппаратов. Однако в целях непрерывного повышения тактических и эксплуатационных качеств л. а всегда следует разрабатывать новейшую перспективную электроаппаратуру. Процесс создания такой аппаратуры должен значительно опережать сроки проектирования л. а. и, как правило, выполняться с расчетом ее применения на различных типах перспективных л. а. Целесообразно одновременно рассматривать несколько вариантов электросхем и типов основных потребителей. Особое внимание следует обращать на главные потребители, так как они оказывают основное влияние на выбор рода тока, напряжения, числа фаз, частоты, мощности и типа источника.

Выбор рода тока. На летательных аппаратах находят применение одновременно постоянный и переменный токи, при этом в зависимости от соотношения мощностей один из них является

основным (первичным), а второй — вспомогательным (вторичным).

Постоянный ток напряжением 27 в прошел длительные эксплуатационные испытания. Надежен и безопасен. Имеет совершенную аппаратуру регулирования напряжения и параллельной работы источников энергии. На постоянном токе наиболее надежно работают электромагнитные устройства (реле, контакторы и т. д.), а лампы накаливания дают наилучший эффект освещения. Однако система постоянного тока имеет значительный вес и низкий к. п. д. при преобразовании энергии. На больших высотах встает проблема коммутации, щеточного контакта и охлаждения.

Переменный ток напряжением 200/115 в начинает приобретать первостепенное значение. Он легко трансформируется по напряжению и частоте, позволяет поднять высотность оборудования, снизить вес и упростить конструкцию машин. На некоторых типах л. а. применение двигателей переменного тока с короткозамкнутым ротором является достаточным доводом в пользу переменного тока.

Однако до сих пор нет простых и надежных способов обеспечения стабильности частоты и параллельной работы источников энергии, что ведет к усложнению энергосистемы и относительному снижению надежности.

Для выбора рода тока первичной энергосистемы потребители разбиваются на три группы и определяется суммарная их мощность с учетом коэффициента одновременности включения:

1. Потребители, требующие питания только постоянным током: (электромагнитные краны, цепи управления, сигнализации и приборы).

2. Потребители, требующие питания только переменным током (некоторые виды радиосвязной, радиолокационной, навигационной, автоматической и импульсной аппаратуры).

3. Потребители, для которых род тока безразличен (нагревательные приборы, светотехнические устройства, электродвигатели насосов и некоторые виды радиоаппаратуры).

Учитывая общую потребную мощность электроэнергии, разбивку ее по группам, а также особые требования к питанию отдельных потребителей, выбирается основной род тока первичной энергосистемы летательного аппарата.

Для основного рода тока устанавливаются первичные источники энергии, целесообразность установки первичных источников энергии для вспомогательного рода тока определяется величиной потребной мощности. Иногда имеет смысл получить вспомогательный род тока преобразованием его из основного рода тока. Этот способ получил наибольшее распространение для малых мощностей.

Необходимо совершенно исключить распространенную практику применения разногипных по роду тока, напряжению, числу фаз и частоте потребителей и источников энергии, так как это зна-

чительно снижает надежность и увеличивает вес электрооборудования.

Выбор напряжения, числа фаз и частоты.

Напряжение. Выбор номинального напряжения зависит от назначения и размеров л. а., количества и мощности электропотребителей. Оптимальное напряжение определяется расчетным путем и должно быть стандартным.

Для постоянного тока (исходя из условия безопасности обслуживания) наиболее целесообразно напряжение 27 в. Применение повышенных напряжений имеет смысл только для тяжелых самолетов, однако оно не получило распространения.

Для переменного тока (исходя из условия минимального веса) наиболее целесообразно напряжение 200/115 в с заземленной силовой нейтралью.

Число фаз. В весовом отношении наиболее рационален трехфазный переменный ток, но для него требуется усложненная защита и коммутация.

Для потребителей малых мощностей целесообразнее применять однофазный переменный ток, используя силовую нейтраль при строгой равномерности распределения нагрузок по фазам.

Частота. Оптимальной частотой для всего комплекса самолетного оборудования следует считать частоту 400 гц, хотя для отдельных потребителей лучшими являются частоты 800, 1000, 1200 и 2000 гц.

Выбор типа и числа источников электрической энергии. Выбранный род тока, напряжение, число фаз, частота и мощность потребителей определяют тип и мощность источников энергии, а их минимальное количество определяется числом авиадвигателей.

В процессе проектирования самолета количество и мощность потребителей, как правило, возрастают, поэтому величину мощности следует увеличить до 50% по сравнению с мощностью, выявленной на начальной стадии проектирования.

При выборе генераторов должен быть обеспечен резерв мощности по средней нагрузке, равный 50—100% в зависимости от типа и назначения летательного аппарата.

Расчеты электрических параметров. Согласно принципиальным электросхемам и условиям работы электроагрегатов рассчитывают потребные мощности по функциям, строятся графики нагрузок источников энергии в различных режимах полета, выполняются расчеты сечений проводов и весов электрических систем.

При этом целесообразно проводить сравнительные расчеты различных вариантов схем для одной и той же системы, что позволяет выявить оптимальный вариант схемы. В этом случае существенную помощь оказывают обобщенные материалы по ранее спроектированным системам.

Разработка схем функциональных связей между системами. Современные летательные аппараты оборудуются сложными электрическими, электронными, радиосвязными, радиолокационными системами.

Поскольку работа систем, как правило, автоматическая и взаимосвязанная различными сигналами, командами и исполнением, то для согласования работы всего комплекса оборудования необходимо разрабатывать схемы функциональных связей между системами.

Схемы должны включать все основные блоки и их взаимосвязи, направления движения сигналов, команд и исполнения, параметры сигналов и команд, количество и сечения проводов в связях и особые требования к отдельным блокам и системам.

Разработка полумонтажных электросхем. Упрощенные полумонтажные электросхемы должны разрабатываться по отсекам на основании принципиальных электросхем.

Как отмечалось выше, на этапе эскизного проектирования допускается разработка упрощенных полумонтажных схем, которые целесообразно изображать на чертежах принципиальных электросхем. Это позволяет решать указанные задачи при минимальной затрате времени на проектирование.

Компоновка распределительных устройств. Рациональная компоновка распределительных устройств должна предусматриваться при разработке принципиальной схемы энергосистемы. Центральные распределительные устройства (ЦРУ), как правило, следует размещать вблизи генераторов и основных силовых потребителей. От ЦРУ питаются силовые потребители и вторичные распределительные устройства (РУ), расположенные в основном в кабинах экипажа. Последние обеспечивают питанием мелкие потребители и цепи управления электрических систем.

На ЦРУ и РУ защита группируется по функциям, а внутри функций по назначению потребителей.

Между распределительными шинами энергия должна передаваться по схеме, обеспечивающей высокую надежность и живучесть. При компоновке распределительных устройств следует учитывать, что системы передачи и распределения электрической энергии по способу сборной шины без защиты питающих линий мало надежны и опасны в пожарном отношении. Сборные шины имеют значительную протяженность и, следовательно, большую вероятность к. з., и могут вызвать серьезные разрушения и пожар на л. а.

Компоновка электроаппаратуры. Компоновка электроаппаратуры должна учитывать влияние ускорений, вибраций, влажности и температуры, обеспечивать технологичность монтажа, удобство и надежность эксплуатации.

Агрегаты электрооборудования и кабели надо устанавливать так, чтобы их можно было осмотреть и заменить с минимальными затратами времени.

При компоновке следует учитывать особенности эксплуатации электроаппаратуры. Так, например, для обеспечения надежной ра-

боты угольного регулятора напряжения его ось должна располагаться перпендикулярно продольной оси самолета и т. п.

Компоновка электрожгутов по основным магистралям. Жгуты и кабели надо прокладывать по кратчайшим расстояниям и по возможности удалять от гидросистемы, системы горючего и движущихся частей. Жгуты и разъемы должны обеспечивать удовлетворительную циркуляцию воздуха. Электропроводки в трубах по возможности следует избегать, а при необходимости предусматривать дренирование и естественную вентиляцию.

Составление технических заданий на новую электроаппаратуру. В период эскизного проектирования при разработке принципиальных электросхем выявляется необходимость применения новых электроагрегатов.

Глубина анализа и тщательность проработки принципиальных электросхем с учетом аварийных режимов работы систем позволяет определить наиболее целесообразные виды нового электрооборудования. В соответствии с принципиальными электросхемами составляются технические задания и открываются заказы на разработку новой электроаппаратуры.

Эскизный проект рассматривается заказчиком. Существенные замечания и пожелания заказчика вносятся в чертежи.

Эскизный проект является основой для всех дальнейших этапов проектирования.

§ 3. МАКЕТИРОВАНИЕ

В соответствии с эскизным проектом изготавливается деревянный макет л. а. в натуральную величину, на котором устанавливаются модели электроагрегатов, щитков, пультов, распределительных устройств, коробов и других видов оборудования.

На макете проверяется рациональность компоновки, конструкции, технологичность и удобство эксплуатации электрооборудования.

Макет в своих деталях должен приближаться к реальному л. а. Хорошо отработанный макет повышает качество и сокращает время рабочего проектирования и постройки опытного л. а.

Макет принимается макетной комиссией, при этом выявляются и устраняются недостатки компоновки с учетом пожеланий заказчика. Проводятся необходимые доработки макета и вносятся соответствующие изменения в чертежи эскизного проекта.

Параллельно с компоновкой электроагрегатов на макете л. а. в лабораториях конструкторского бюро и соответствующих институтах должны монтироваться и исследоваться действующие модели электрических систем с натуральной аппаратурой согласно проектируемым принципиальным электрическим схемам.

Если мощности электрической системы велики, то испытание целесообразно выполнять физическим моделированием.

Действующие модели электрической системы следует испытывать в нормальных и аварийных режимах работы.

Одновременно должны разрабатываться и исследоваться несколько вариантов электрических схем. По результатам испытаний окончательно выбирают наиболее надежные и легкие электрические системы.

Комплексные испытания и доводку электрических систем надо проводить на всех этапах проектирования летательного аппарата.

Одновременно смежные конструкторские бюро должны моделировать и исследовать вновь проектируемую электроаппаратуру.

§ 4. РАБОЧЕЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

В соответствии с эскизным проектом, макетом и результатами лабораторных исследований разрабатываются рабочие чертежи принципиальных, полумонтажных, монтажных электросхем и конструктивных установок. Производятся окончательные расчеты потребляемых мощностей, строятся графики нагрузок источников энергии, выполняются расчеты сечений проводов и защиты электрических сетей, рассчитываются токи к. з. в аварийных режимах, уточняются готовые изделия и окончательно отрабатывается техническая документация на вновь заказанную аппаратуру.

Идеи, заложенные в принципиальных электросхемах эскизного проекта, практически должны переноситься без изменений на рабочие чертежи. Принципиальные изменения можно вносить только в результате выявленных недостатков при совместных исследованиях электрической системы изготовителем аппаратуры, лабораториями и конструкторским отделом, проектирующим летательный аппарат.

Схемы и конструкции, предусматриваемые рабочими чертежами, должны быть просты, технологичны, удобны и надежны в эксплуатации.

Оформление технической документации следует выполнять в соответствии с рекомендациями, изложенными в гл. II.

§ 5. МОНТАЖ ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА

По рабочим чертежам изготовляют и монтируют щитки, пульты, распределительные устройства, корпуса и другие конструктивные установки электрооборудования.

Внутренние монтажи агрегатов должны выполняться вне л. а, на верстаках, что значительно снижает трудоемкость и повышает качество монтажей.

В процессе монтажа выявляются и устраняются принципиальные и формальные ошибки, допущенные в рабочих чертежах. При проверке электрических систем под током выявляют и устраняют дефекты и ошибки, допущенные в принципиальных и полумонтажных схемах.

Уточнения чертежей необходимо выполнять только техническими записками. Для упрощения работы по чертежам технические записки целесообразно оформлять за одним номером ко всему комплексу схем, связанных с данными изменениями. Так как большое число технических записок затрудняет чтение чертежей и особенно электросхем, их следует периодически вносить в чертежи.

На этом этапе необходимо тщательно отрабатывать монтажи, фотографирование и выпуск фотомонтажных схем.

§ 6. ЗАВОДСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА

При заводских испытаниях проверяют отдельные электрические системы и весь комплекс электрооборудования на земле и в различных режимах полета, выявляют и устраняют конструктивные, принципиальные и эксплуатационные дефекты.

Отдельные электрические системы вследствие недостаточной проработки и испытаний на предыдущих этапах проектирования могут подвергаться существенным изменениям, что удлинит сроки выпуска и увеличивает стоимость опытного л. а. При правильной методике проектирования подобные явления исключаются.

Необходимые изменения вносятся в рабочие чертежи.

§ 7. ГОСУДАРСТВЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА

При государственных наземных и летных испытаниях опытного образца проверяют электрические системы в соответствии с тактическим назначением л. а. Работоспособность электрооборудования определяется в нормальных и аварийных условиях полета.

Искусственное создание и проверка отдельных аварийных режимов электрических систем на реальном л. а. могут быть связаны с тяжелыми последствиями. В этом случае следует изготавливать действующие макеты и исследования проводить в лабораторных условиях. Примером могут служить лабораторные исследования живучести энергетических систем при коротких замыканиях.

Действующие макеты обеспечивают наиболее глубокое и всестороннее исследование процессов, происходящих в аварийных режимах. Макеты с натуральной аппаратурой и сетью целесообразно предъявлять на государственные испытания еще на этапе эскизного проектирования л. а.

При летных испытаниях выявляют принципиальные, конструктивные и эксплуатационные недостатки в электрооборудовании л. а. и намечают пути их устранения. Незначительные дефекты устраняют в процессе испытаний.

По результатам испытаний составляют акт с указанием дефектов и рекомендаций по доработке. После проработки акта необходимые изменения вносят в чертежи и проводят доработку опытного

образца. Если доработки имели принципиальный характер, то опытный образец предъявляют на повторные испытания.

Отдельные мероприятия по улучшению работы систем могут внедряться непосредственно при запуске л. а. в серию.

§ 8. ЗАПУСК В СЕРИЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Перед запуском л. а. в серийное производство в чертежи вносят уточнения, связанные с устранением дефектов, выявленных в процессе макетирования, опытного производства, заводских и государственных испытаний, и изменения, вызванные технологическими особенностями серийного производства.

Процесс отработки чертежей для серийного производства обычно оказывается весьма трудоемким и связан с выпуском большого количества дополнительной технической документации. Однако при наличии рассмотренной выше системы рационального проектирования значительно упрощается процесс подготовки, повышается качество и сокращается время выпуска технической документации для серийного производства.

КРИТЕРИИ ВЕСА И НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Глава I

КРИТЕРИИ ВЕСА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

§ 1. ПОЛЕТНЫЙ ВЕС ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Определение веса электрооборудования л. а. начинается с анализа весов устанавливаемых агрегатов, сгруппированных по функциям (назначению) согласно принципиальным электросхемам.

Весовые характеристики электрооборудования определяются последовательно, начиная с элементарного веса и кончая полетным весом всего электрооборудования л. а.

Основными весовыми характеристиками являются следующие.

Элементарный вес электроагрегата. Это вес его составных частей. Для одной и той же мощности электроагрегата элементарные веса могут изменяться в зависимости от конструкции электроагрегата, рода тока, напряжения, частоты и условий монтажа.

Приведем обозначения элементарных весов электроагрегата:

g_{1A} — вес электрической части электроагрегата (электродвигатель, реле, концевые выключатели и др.);

g_{2A} — вес механической части электроагрегата (привод, редуктор, насос и т. п.);

g_{3A} — вес внешней аппаратуры, обслуживающей электроагрегат (выключатели, реле, концевые выключатели, разъемы, предохранители и т. п.);

g_{4A} — вес сетевых проводов, прокладываемых на л. а. для питания электроагрегата;

g_{5A} — вес конструкции установки электроагрегата (кронштейны, тяги и пр.);

g_{6A} — вес монтажных деталей электроагрегата (короба, трубы, шланги, хомуты и т. п.);

g_{7A} — вес энергосистемы постоянного тока, приходящийся на питание электроагрегата.

g_{8A} — вес энергосистемы переменного тока, приходящийся на питание электроагрегата.

g_{9A} — дополнительный вес летательного аппарата, вызванный установкой данного агрегата (увеличение веса авиадвигателей, системы охлаждения, топлива и пр.).

Дадим некоторые пояснения по определению элементарных весов электроагрегатов.

Веса готовых изделий — агрегатов и коммутационной аппаратуры (g_{1A} ; g_{2A} ; g_{3A}) — определяются согласно данным технического описания или взвешиванием.

Вес сетевых проводов (g_{4A}) — определяется в соответствии с их сечениями и длиной конкретно для данного типа л. а. Вес погонного метра провода определяется из таблицы технических данных или взвешиванием.

Вес конструкции установок (g_{5A}) — определяется по установочным чертежам агрегатов. Он должен учитывать все элементы конструкции л. а., связанные с установкой данного агрегата.

Вес монтажных деталей (g_{6A}) — определяется по монтажным чертежам. При этом обязательно учитывается увеличение веса л. а., вызванное наличием электромонтажей.

Вес энергосистемы постоянного тока (g_{7A}), приходящийся на питание данного потребителя, определяется из суммарного веса энергосистемы постоянного тока и общей мощности всех потребителей:

$$g_{7A} = \frac{G_{16}}{\sum_{i=1}^n P_i} \cdot P_k,$$

где G_{16} — вес энергосистемы постоянного тока. Индекс «16» показывает, что в вес включены с первого по шестой элементы веса. Аналогичные индексы будут применяться и в дальнейшем изложении;

$\sum_{i=1}^n P_i$ — суммарная мощность потребителей постоянного тока, включая и кратковременные потребители;

n — число потребителей постоянного тока;

P_k — мощность данного потребителя.

Вес энергосистемы переменного тока (g_{8A}), приходящийся на питание данного потребителя, определяется аналогично.

Дополнительный вес летательного аппарата (g_{9A}), вызванный установкой электроагрегата, зависит от типа летательного аппарата и может превосходить сумму всех остальных восьми элементов в 2—20 раз.

Из первых восьми весовых элементов электроагрегата наибольшими по числовому значению являются веса готовых изделий, проводов и энергосистем постоянного и переменного токов, приходящихся на обслуживание данного электроагрегата.

Перечисленные выше весовые характеристики дают возможность определить устанавливаемый и полетный вес отдельных электроагрегатов, функций и всего комплекса электрооборудования л. а.

Весом электроагрегата без учета веса энергосистемы G_{16A} является сумма первых шести элементарных весов:

$$G_{16A} = g_{1A} + g_{2A} + g_{3A} + g_{4A} + g_{5A} + g_{6A}.$$

Вес энергосистемы для электроагрегата G_{78A} определяется суммой седьмого и восьмого элементарных весов:

$$G_{78A} = g_{7A} + g_{8A}.$$

Устанавливаемым весом электроагрегата G_{18A} называется сумма первых восьми элементарных весов:

$$G_{18A} = G_{16A} + G_{78A}.$$

В зависимости от типа электроагрегата некоторые составляющие веса могут отсутствовать.

Устанавливаемый вес электроагрегата учитывает увеличение веса за счет энергосистем обслуживания.

Полетный вес электроагрегата G_{19A} определяется суммой девяти элементарных весов по формуле

$$G_{19A} = G_{18A} + g_{9A}.$$

Полетный вес электроагрегата (системы) в отличие от устанавливаемого или «мертвого» веса учитывает все дополнительные веса, которые неизбежно связаны с установкой данного агрегата, и позволяет оценить его действительную «тяжесть» для летательного аппарата.

Так, например, полетный вес генератора можно определить как

$$G_{19} = G_{18} + g_{9к} + g_{9т} + g_{9ох},$$

где G_{18} — устанавливаемый вес генератора;

$g_{9к}$ — дополнительный вес конструкции л. а., вызванный установкой генератора;

$g_{9т}$ — дополнительный вес авиадвигателя, топлива, смазки и конструкции летательного аппарата, обусловленный отбором мощности от авиадвигателя на привод генератора. Этот вес зависит от характеристик авиадвигателя по расходу топлива и смазки и продолжительности полета;

$g_{9ох}$ — вес системы охлаждения генератора, зависящий от скорости, высоты и продолжительности полета.

В частности, при поршневом авиадвигателе уравнение для определения полетного веса генератора принимает вид

$$G_{19} = (1 + \alpha + \beta + \gamma) G_{18} + (g + g_{г.см} T) \frac{1,36 P_r}{\eta_l \eta_{пр}} + g_{ох} T \frac{P_r}{\eta_l \eta_{пр}} (1 - \eta_r \eta_{пр}),$$

где α — отношение веса конструкции л. а., вызванного усилением ее элементов при установке генератора, к его «мертвому» весу;

β — отношение веса приводного устройства генератора к его «мертвому» весу;

γ — отношение веса системы охлаждения генератора к его «мертвому» весу;

g — вес авиационного двигателя на единицу мощности;

$g_{г.см}$ — расход горючего и смазки на единицу мощности авиадвигателя в час;

$g_{ох}$ — расход охлаждающего агента на единицу мощности генератора в час;

P_r — мощность генератора в квт;

η_r — к. п. д. генератора;

$\eta_{пр}$ — к. п. д. приводного устройства;

T — время полета в час.

Под приводным устройством понимается система передачи движения от авиадвигателя к генератору. Для генераторов постоянного тока и переменного тока нестабильной частоты — это редуктор, для генераторов переменного тока стабильной частоты — привод постоянной скорости.

Для реактивных двигателей вес и расходы горючего и смазки задаются на единицу тяги. Если удельным расходам по тяге придать индекс — штрих, то уравнение для полетного веса генератора принимает вид

$$G_{19} = (1 + \alpha + \beta + \gamma) G_{18} + (g' + g'_{г.см} T) \frac{1,02 P_r}{V \eta_l \eta_{пр}} + g_{ох} T \frac{P_r}{\eta_l \eta_{пр}} (1 - \eta_r \eta_{пр}),$$

где V — скорость полета в м/сек.

Аналогично определяются веса потребителей, функций и всего комплекса электрооборудования летательного аппарата.

§ 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕСА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Согласно введенной классификации вес электрооборудования л. а. разбивается на четыре вида: элементарный, суммарный, устанавливаемый (мертвый) и полетный.

Понятия каждого вида веса в равной степени относятся к отдельным электроагрегатам, функциям и всему комплексу электрооборудования л. а.

Для большей наглядности последовательность расчета веса представлена схемой, показанной на рис. 1. 1.

В схеме расчета представлены номера с 1-го по 30-й с цифровыми индексами, показывающими элементарные веса, включенные в расчет. Например: 1_{16} ; 3_{78} ; 22_{19} , в которых включены элементарные веса соответственно с 1 по 6; с 7 по 8 и с 1 по 9 включительно.

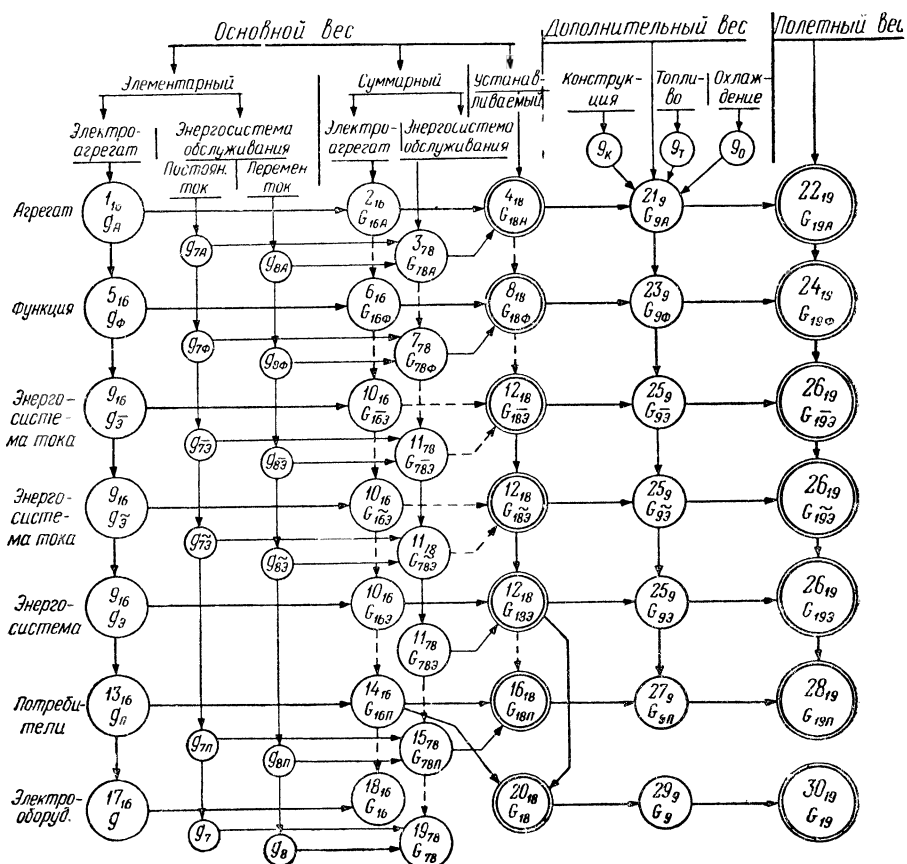


Рис. 1. 1. Схема расчета веса электрооборудования л. а.

Буквой — g с буквенно-цифровым индексом обозначены элементарные веса. Например: g_{5A} — 5-й элементарный вес агрегата; g_{13} — 1-й элементарный вес энергосистемы; $g_{3п}$ — 3-й элементарный вес потребителей.

Буквой G с соответствующим индексом обозначаются суммарные, устанавливаемые и полетные веса. Цифровой индекс показывает, какие элементарные веса включены при расчете, а буквен-

ный — вид оборудования. Например: $G_{16\Phi}$ — суммарный вес функции;

$G_{18п}$ — устанавливаемый вес потребителей.

Номера в комбинации со стрелками указывают порядок расчета. Сплошными стрелками показан наиболее удобный порядок расчета веса: жирными — электроагрегатов, а тонкими — энергосистемы обслуживания электроагрегатов. Для некоторых весов возможен и другой порядок расчета, который показан пунктиром.

Для упрощения дальнейших расчетов при определении суммарных, устанавливаемых и полетных весов электроагрегатов последнее необходимо группировать по функциям в соответствии с принципиальными электросхемами.

В схеме показан расчет веса для различных вариантов питания потребителей постоянным и переменным токами. На практике количество вариантов питания ограничено и схема расчета значительно упрощается.

Полетный вес электроагрегатов, функций и всего электрооборудования является действительным весом, вносимым на летательный аппарат при установке электроагрегатов. Полетный вес является решающим фактором при сравнении электрооборудования различных типов л. а.

§ 3. ОТНОСИТЕЛЬНЫЙ ВЕС ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

В процессе проектирования л. а. для выбора наилегчайшей системы электрооборудования приходится разрабатывать ряд вариантов отдельных электрических систем и сравнивать их по весу. Однако сравнением элементарных, суммарных, устанавливаемых и полетных весов электрооборудования нельзя определить наилегчайшую электросистему. Поэтому для сравнительного анализа весов электрооборудования различных систем вводят понятие относительного веса, представляющего отношение полетного веса к полезной выходной мощности агрегата (системы).

Так, например, относительный полетный вес электроагрегата будет

$$\bar{G}_{19A} = \frac{G_{19A}}{P_A},$$

где P_A — полезная выходная мощность электроагрегата.

Относительные веса подразделяются на элементарные, суммарные, устанавливаемые, полетные и вычисляются для отдельных электроагрегатов, функций и всего электрооборудования л. а.

Для однотипной аппаратуры одинаковой мощности относительный вес удобнее определить для всего комплекта, входящего в функцию.

При определении относительного веса функции следует исходить из осредненных относительных весов основных электроагрегатов, как наиболее точных, опуская при этом относительные веса

второстепенных агрегатов, имеющие резко выраженные крайние значения.

Таким образом, относительный полетный вес является основным критерием веса при сравнительной оценке весов отдельных элементов и всего комплекса электрооборудования различных типов летательных аппаратов.

В процессе проектирования для сравнительной оценки веса электрических систем весьма полезно воспользоваться приближенными расчетами относительных устанавливаемых весов.

В приближенном расчете производится простое суммирование весов и мощностей.

1. Относительный устанавливаемый вес электроагрегата

$$\dot{G}_{18A}^* = \frac{G_{18A}}{P_A}.$$

2. Относительный устанавливаемый вес функции

$$\dot{G}_{18\Phi}^* = \frac{G_{18\Phi}}{P_{\Phi}},$$

где $G_{18\Phi}$ — суммарный вес функции,

P_{Φ} — суммарная выходная мощность функции.

3. Относительный устанавливаемый вес энергосистемы постоянного тока

$$\dot{G}_{189}^- = \frac{G_{189}^-}{P_9^-},$$

где G_{189}^- — суммарный вес энергосистемы постоянного тока,

P_9^- — суммарная выходная мощность энергосистемы постоянного тока.

4. Относительный устанавливаемый вес энергосистемы переменного тока

$$\dot{G}_{189}^{\sim} = \frac{G_{189}^{\sim}}{P_9^{\sim}},$$

где $G_{189}^{\sim}$ — суммарный вес энергосистемы переменного тока;

$P_9^{\sim}$ — суммарная выходная мощность энергосистемы переменного тока.

5. Относительный устанавливаемый вес энергосистемы

$$\dot{G}_{189}^* = \frac{\dot{G}_{189}^- + \dot{G}_{189}^{\sim}}{2}.$$

* Звездочка означает относительный вес.

6. Относительный устанавливаемый вес электропотребителей.

$$\bar{G}_{18n}^* = \frac{\sum_1^n \bar{G}_{18n}^*}{n},$$

где $\sum_1^n \bar{G}_{18n}$ — суммарный вес потребителей функции;

n — число потребностей в функции.

7. Относительный устанавливаемый вес электрооборудования л. а.

$$\bar{G}_{18}^* = \frac{\bar{G}_{18a}^* + \bar{G}_{18n}^*}{2}.$$

Глава II

НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

§ 1. ПРОБЛЕМА НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Проблема надежности работы оборудования приобретает особое значение в связи с тем, что развитие функций электрооборудования идет в направлении от вспомогательных к решающим функциям управления полетом летательного аппарата.

Расширение круга задач, решаемых средствами электрооборудования, приводит к резкому усложнению последних, массовому применению электроники, автоматики и созданию комплексных систем оборудования.

Вместе с тем на вновь создаваемые системы налагаются жесткие ограничения по созданию запасов прочности (электрической, механической и др.) в связи с необходимостью получения систем с минимальным весом и объемом.

В связи с ускорением темпов технического прогресса резко сокращаются сроки разработки новых образцов, что уменьшает количество дополнительных испытаний различных вариантов для сравнения их надежности.

Рост темпов повышения надежности отстает от потребностей в ней, что снижает эффективность новой техники, поэтому проблема надежности является важнейшей в процессах проектирования, производства и эксплуатации.

Электрические системы должны быть просты по устройству, надежны в эксплуатации и живучи в боевых условиях.

От рациональности и правильности схемы и конструктивного и монтажного выполнения электрических систем во многом зависит их эксплуатационная надежность и живучесть.

Все потребители по степени их важности делятся на три категории:

1. Потребители, обеспечивающие полет; отказ их может повлечь за собой аварию, катастрофу или невыполнение задания.

2. Потребители, отказ которых может ухудшить условия работы экипажа или усложнить условия полета.

3. Потребители, работающие только на земле.

Для обеспечения полной безопасности и эксплуатационной надежности к потребителям первой категории предъявляются следующие требования:

1. Потребители должны быть обеспечены питанием при всех режимах работы энергосистемы, включая повреждение отдельных узлов питательной сети.

2. Схемы питания и управления системами должны исключать возможность возникновения недопустимых для безопасности полета режимов работы или положений управляемых агрегатов при отказе системы или при появлении неисправности в цепях управления или питания.

3. В системах, управляемых двумя и более членами экипажа, должна быть предусмотрена блокировка, исключающая одновременное включение системы на противоположное движение (уборка и выпуск, закрывание и открывание и т. д.) и обеспечивающая при одновременном включении несколькими членами экипажа управление системой только основным членом.

Основными характеристиками надежности электрических систем л. а. являются:

Электрическая надежность — наличие дублирования и защиты, правильность выбора коммутационной аппаратуры и других элементов сети, отсутствие вредного влияния одних потребителей электроэнергии на работу других.

Безопасность системы. Любой отказ системы или ошибочные действия экипажа не должны вызывать прямой аварийной ситуации. Четкая, немедленная и наглядная сигнализация отказа системы.

Наглядность и достаточность сигнализации положения управляемого органа. Наличие блокировок и предохраняющих устройств, исключающих случайное или неверное включение системы. Отказ блокировки не должен нарушать работу основной системы управления.

Удобство эксплуатации. Простота предполетного осмотра. Удобство пользования органами управления в полете и возможность их быстрого отыскания. Сведение к минимуму возможности ошибочных операций в полете.

Возможность быстрого отключения управляемой системы при аварийной ситуации.

Боевая живучесть. Непрерывность питания системы при повреждении части источников электроэнергии или части энергоузла. Быстрое и надежное отключение поврежденного участка системы.

§ 2. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ПАРАМЕТРЫ В РАСЧЕТАХ НАДЕЖНОСТИ

В математических расчетах надежности электрических систем летательных аппаратов приняты общеизвестные основные понятия, термины и параметры, которые позволяют анализировать и оценивать надежность различных систем.

Система — совокупность совместно действующих технических устройств, предназначенных для выполнения определенных функций.

Элемент системы — часть системы, предназначенная для выполнения определенных функций.

Исправность — состояние, при котором система (элемент) в данный момент времени соответствует техническим требованиям.

Работоспособность — состояние, при котором система (элемент) способна в данный момент времени выполнять свои функции по основным параметрам, обеспечивая безопасность полета.

Неисправность — состояние, при котором система (элемент) в данный момент времени не соответствует хотя бы одному из установленных технических требований.

«Основная неисправность» приводит к отказу, а «второстепенная неисправность» не вызывает отказ.

Отказ — полная или частичная утрата работоспособности системы (элемента).

Безопасность — свойство системы (элемента) при выполнении заданных функций в определенных условиях эксплуатации и при возможных внешних воздействиях не вызывать аварии л. а. и угрозы для жизни экипажа.

Надежность — свойство системы (элемента) сохранять работоспособность в течение заданного интервала времени в определенных условиях эксплуатации.

Восстанавливаемость — свойство системы (элемента) к восстановлению работоспособности в результате устранения причин отказа.

Невосстанавливаемость — свойство системы (элемента) не поддаваться восстановлению после возникновения отказа.

Среднее время безотказной работы $T_{ср}$ изделий — есть среднее арифметическое времени исправной их работы.

Для невосстанавливаемых изделий среднее время безотказной работы определяется как отношение суммарной наработки отказавших изделий к их общему числу, т. е.

$$T_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{N},$$

где t_i — время наработки изделия до появления отказа;
 N — общее число изделий.

Для восстанавливаемых изделий среднее время безотказной работы определяется в два этапа. Сначала вычисляется величина среднего времени $t_{i \text{ ср}}$ наработки между отдельными восстанавливаемыми отказами каждого изделия как отношение суммарного времени работы изделия $\Sigma \Delta t$ к общему числу его отказов n за это время, т. е.

$$t_{i \text{ ср}} = \frac{\Sigma \Delta t}{n},$$

где Δt — время между двумя последовательными отказами изделия.

Затем вычисляется среднее время безотказной работы всего количества N данных изделий:

$$T_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^N t_{i \text{ ср}}}{N}.$$

Среднее время безотказной работы является наглядной количественной характеристикой надежности. Оно удобно для оценки надежности простейших элементов, которые после отказа не ремонтируются. Его можно использовать и для оценки надежности сложных устройств, но в последнем случае эта характеристика будет отражать величину среднего времени исправной работы множества систем до первого их отказа.

Частота отказов f — отношение числа изделий, отказавших в единицу времени, к первоначальному числу испытываемых изделий при условии, что все вышедшие из строя изделия не восстанавливаются, т. е. число испытываемых изделий во время испытания уменьшается (рис. 2.1):

$$f = \frac{\Delta N}{N_0 \Delta t},$$

где ΔN — число отказавших изделий в интервале времени Δt ;
 N_0 — первоначальное число испытываемых изделий;
 Δt — интервал времени.

По величине частоты отказов можно судить о числе изделий, которые могут выйти из строя в заданном промежутке времени, и определить количество необходимых запасных элементов.

Интенсивность отказов λ (рис. 2.2) — отношение числа изделий, отказавших в единицу времени, к среднему числу изделий, исправно работающих в данный отрезок времени:

$$\lambda = \frac{\Delta N}{N \cdot \Delta t} = \frac{2 \Delta N}{(N_1 + N_2) \Delta t};$$

где Δt — интервал времени работы;

N_1 — число изделий, исправно работающих в начале интервала Δt ;

N_2 — число изделий, исправно работающих в конце интервала Δt ;

N — число изделий, исправно работающих за время Δt ;

ΔN — число отказавших изделий в промежуток времени Δt .

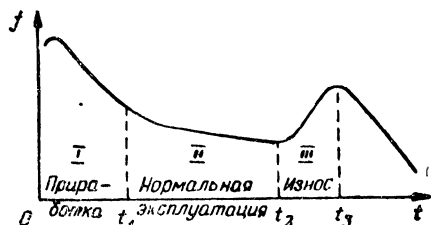


Рис. 2.1. Типичная кривая изменения частоты отказов аппаратуры по этапам эксплуатации

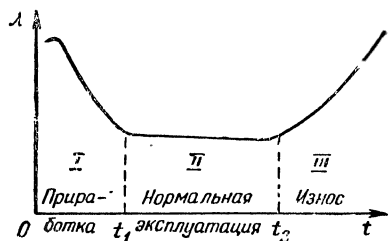


Рис. 2.2. Типичная кривая изменения интенсивности отказов аппаратуры по этапам эксплуатации

В интервале времени от 0 до t_1 интенсивность отказов резко уменьшается. На этом участке элементы прирабатываются и выходят из строя за счет внутренних дефектов. На участке от t_1 до t_2 интенсивность отказов для большинства элементов есть величина постоянная. Этот участок характеризует нормальную работу элементов. Рост кривой интенсивности отказов по истечении времени t_2 объясняется механическим или электрическим износом элементов.

Интенсивность отказов изделий наиболее полно характеризует надежность элементов и является одной из лучших характеристик надежности.

Так как считается, что все элементы в аппаратуре работают в период нормальной эксплуатации, т. е. периоды приработки и износа не рассматриваются, то значения интенсивности отказов даются в виде постоянной величины на один час работы.

Ориентировочные данные по интенсивности отказов различных элементов электрооборудования летательных аппаратов приведены в табл. 2. 1.

Таблица 2.1.

Ориентировочные данные интенсивности отказов элементов электрооборудования

Наименование элементов	Интенсивность отказов на 1 час работы	Наименование элементов	Интенсивность отказов на 1 час работы
Сопротивления	$(0,001 \div 1,5) 10^{-5}$	Трансформаторы мощные	$(0,02 \div 0,2) 10^{-5}$
Конденсаторы	$(0,001 \div 16,4) 10^{-5}$	Индуктивности, дроссели	$(0,002 \div 4,4) 10^{-5}$
Потенциометры	$(0,5 \div 13,1) 10^{-5}$	Соленоиды	$0,5 \cdot 10^{-5}$
Электровакуумные приборы	$(0,1 \div 34,5) 10^{-5}$	Соединения штепсельные	$(0,001 \div 9,1) 10^{-5}$
Полупроводниковые диоды	$(0,012 \div 50) 10^{-5}$	Соединения пайкой	$(0,01 \div 1) 10^{-5}$
Полупроводниковые триоды	$(0,02 \div 90) 10^{-5}$	Измерительные приборы	$(0,5 \div 6) 10^{-5}$
Реле	$(0,05 \div 101) 10^{-5}$	Индикаторные лампы	$(0,01 \div 0,3) 10^{-5}$
Переключатели	$(0,0003 \div 2,8) 10^{-5}$	Датчик давления, температуры	$(0,15 \div 6,6) 10^{-5}$
Выключатели, кнопки	$(0,04 \div 1,2) 10^{-5}$	Электродвигатели маломощные	$(0,015 \div 33) 10^{-5}$
Микровыключатели	$26,2 \cdot 10^{-5}$	Электродвигатели силовые	$(0,035 \div 0,2) 10^{-5}$
Пускатели	$(1,2 \div 7,5) 10^{-5}$	Муфты электромагнитные	$(0,043 \div 9,4) 10^{-5}$
Автоматы защиты	$10,2 \cdot 10^{-5}$	Преобразователи	$(25 \div 100) 10^{-5}$
Инерционные предохранители	$5 \cdot 10^{-5}$	Генераторы	$(20 \div 100) 10^{-5}$
Плавкие предохранители	$1 \cdot 10^{-5}$	Генераторы бесконтактные	$(0,8 \div 5) 10^{-5}$
Магнитные усилители	$(0,02 \div 0,5) 10^{-5}$	Аккумуляторные батареи	$(50 \div 100) 10^{-5}$
Электрические фильтры	$0,3 \cdot 10^{-5}$		
Трансформаторы малой мощности	$(0,002 \div 6,63) 10^{-5}$		

По величине интенсивности отказов можно судить о качестве элементов: чем лучше их качество и выше надежность, тем меньше величина интенсивности отказов.

Интенсивность отказов даже однотипных элементов, работающих в одинаковом режиме и одинаковых окружающих условиях,

может колебаться в широких пределах. Ее величина зависит от качества материалов, технологии и культуры производства, сложности элементов и т. п.

В настоящее время данные об интенсивности отказов различных элементов (см. табл. 2.1), как правило, имеют обобщенный характер без указания конкретных условий, для которых они действительны, и могут быть использованы только в приближенных расчетах.

Вероятность безотказной работы P — вероятность того, что в определенных условиях эксплуатации в пределах заданной продолжительности в работе изделия отказов не возникает (рис. 2.3). Вероятность безотказной работы является основной характеристикой надежности.

В общем случае, когда существует сложная зависимость частоты или интенсивности отказов от времени, величина P может вычисляться по формуле

$$P = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}.$$

Для некоторых элементов (систем) поток отказов практически можно рассматривать как простейший поток случайных событий, подчиняющийся закону Пуассона. В этом случае в течение периода нормальной эксплуатации интенсивность отказов изделий не зависит от времени и практически является постоянной величиной ($\lambda = \text{const}$) и тогда вероятная надежность определяется по экспоненциальному закону надежности:

$$P = e^{-\lambda t} = e^{-\frac{t}{T_{cp}}},$$

где t — заданное время работы.

Экспоненциальный закон надежности справедлив, когда механический или электрический износ элементов еще практически не наступил, а период приработки закончен, т. е. он справедлив для периода нормальной работы элементов.

Экспоненциальный закон надежности справедлив для большинства простых электрических систем. Им же пользуются при расчете сложных систем, состоящих из большого числа элементов, изменение надежности которых отлично от экспоненты, а средние времена исправной работы различны. Этот случай типичен для большинства сложных систем. Практика показывает, что расчеты вероятности исправной работы, выполненные на основании экспоненциального закона надежности, во многих случаях хорошо согласуются с экспериментальными данными.

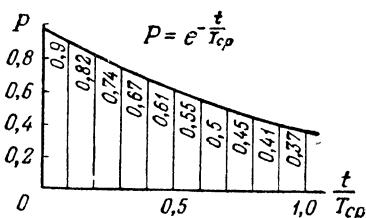


Рис. 2.3. Типичное изменение вероятности безотказной работы во времени

Из экспоненциального закона надежности (см. рис. 2.3) следуют важные выводы:

1. Надежность сложной системы, как и элемента, убывает с течением времени по экспоненциальному закону.

2. Чем сложнее система (нерезервированная), т. е. чем большее число элементов в нее входит, тем ниже ее надежность.

3. Надежность системы в значительной степени зависит от надежности элементов, из которых она состоит.

4. Если в течение заданного времени работы имеется вероятность появления единичного отказа, т. е. $t_p = T_{ср}$, то вероятность безотказной работы изделия будет порядка 0,37.

5. Если время безотказной работы в 10 раз превышает заданное время работы, т. е. $t_p = 0,1 T_{ср}$, то вероятность безотказной работы изделия будет не выше 0,9.

Таким образом, для обеспечения более высокого уровня вероятности безотказной работы необходимо значительно увеличивать среднее время безотказной работы по сравнению с заданным временем работы изделия.

Надежность системы можно увеличивать, упрощая ее и увеличивая надежность входящих элементов. Однако уменьшение числа элементов в системе, как и увеличение их надежности, является сложной технической задачей.

Экспоненциальный закон надежности неприменим для начального периода работы системы, когда происходит процесс приработки и интенсивность отказов не является величиной постоянной.

Вводя в формулу экспоненциального закона дополнительный множитель K , полученный из статистики, можно учесть влияние на исправную работу системы отказа в период приработки и другие факторы.

§ 3. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ ВЕРОЯТНОСТЕЙ В ПРИЛОЖЕНИИ К РАСЧЕТУ НАДЕЖНОСТИ

Теория вероятностей изучает массовые случайные события или процессы, обладающие устойчивой частотой появления.

При неограниченном увеличении числа испытаний статистическое значение частоты приближается (сходится по вероятности) к некоторому числу, называемому вероятностью данного события:

1. Если при данном испытании осуществление одного из рассматриваемых событий $A_1, A_2 \dots A_n$ не препятствует осуществлению любого другого из них, то события называются *совместимыми*. При этом события будут независимыми, если появление одного из них не изменяет вероятности появления другого.

Для совместимых событий применима теорема умножения вероятностей, записываемая для независимых событий в следующем виде:

$$P(A_1 \cdot A_2 \dots A_n) = P(A_1) \cdot P(A_2) \dots P(A_n).$$

2. Если при данном испытании может произойти только одно из рассматриваемых событий $A_1, A_2 \dots A_n$, то такие события называются *несовместимыми*.

Для несоместимых событий применима теорема сложения вероятностей:

$$P(A_1 + A_2 + \dots + A_n) = P(A_1) + P(A_2) + \dots + P(A_n).$$

События, заключающиеся в работоспособном состоянии системы (элемента) и в ее отказе, несовместимы, так как система не может одновременно и работать и не работать. В этом случае в теории вероятностей говорят, что несовместимые события образуют полную группу, для которой

$$P + Q = 1,$$

где P — вероятность того, что система будет работоспособна;

Q — вероятность противоположного события (отказа системы).

В общем случае для полной группы событий $A_1, A_2 \dots A_n$

$$\sum_{i=1}^n P(A_i) = 1.$$

В теории надежности различают три основных условных вида соединений систем (элементов): *последовательное, параллельное и смешанное*.

В практике расчетов схемной надежности широкое применение нашел *метод структурных схем*. Расчетная схема по этому методу составляется на основе последовательного и параллельного соединения элементов, входящих в данную систему. Эти виды условных соединений, применяемые для расчетной схемы надежности, не всегда совпадают с конструктивным соединением элементов в системе, т. е. параллельное соединение некоторых элементов в электросхемах при расчете надежности в ряде случаев может быть последовательным.

Последовательным соединением (основным) называется совокупность систем (элементов), для которой необходимым и достаточным условием отказа является отказ хотя бы одной (любой) системы (элемента), входящей в данную совокупность. Расчетная схема и зависимость надежности системы от надежности ее элементов при последовательном соединении приведены на рис. 2.4.

Согласно теореме умножения вероятностей при условии, что отказ каждого из n элементов системы — независимое событие, получим

$$P = P_1 \cdot P_2 \dots P_n,$$

где P — вероятная надежность системы;

$P_1, P_2 \dots P_n$ — вероятная надежность отдельных элементов.

Если надежность всех элементов примерно одинакова, то

$$P = P_i^n.$$

Очевидно, что для системы, состоящей из m типов элементов с вероятностями исправной работы $P_1, P_2 \dots P_m$ и числом элементов $n_1, n_2 \dots n_m$, можно написать $P = P_1^{n_1} P_2^{n_2} \dots P_m^{n_m}$.

Для получения высокой надежности системы с последовательным соединением элементов входящие в нее элементы должны обладать очень высокой степенью надежности, так как отказ одного элемента означает отказ всей системы.

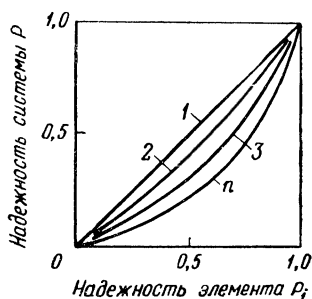
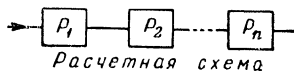


Рис. 2.4. Зависимость надежности системы от надежности и числа элементов при последовательном соединении:

1, 2, 3 ... n —число элементов

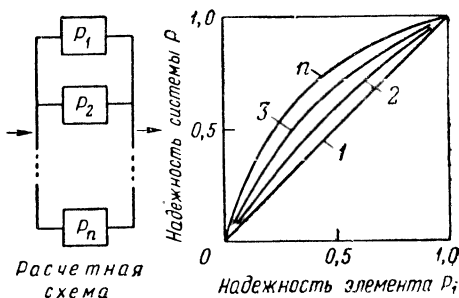


Рис. 2.5. Зависимость надежности системы от надежности и числа элементов при параллельном соединении:

1, 2, 3 ... n —число элементов

Примеры. 1. Система состоит из трех типов элементов ($m=3$), обладающих определенными вероятностями исправной работы, т. е. $P_1=0,995$, $n_1=40$; $P_2=0,995$, $n_2=40$; $P_3=0,985$, $n_3=10$.

Тогда вероятность безотказной работы системы

$$P = 0,995^{40} \cdot 0,995^{40} \cdot 0,985^{10} = 0,82 \cdot 0,82 \cdot 0,87 = 0,58.$$

2. Система имеет 100 элементов, соединенных последовательно.

Определить среднюю вероятность безотказной работы элементов, обеспечивающих вероятность исправной работы системы, равную 0,9:

$$P = 0,9 = P_i^{100},$$

$$P_i = 0,9981.$$

Параллельным соединением называется совокупность систем (элементов), для которой необходимым и достаточным условием отказа является отказ всех систем (элементов), входящих в совокупность.

Расчетная схема и зависимость надежности системы от надежности ее элементов при параллельном включении приведена на рис. 2.5.

Вероятность отказа системы Q при параллельном включении элементов равна произведению вероятностей отказов входящих элементов:

$$Q = \prod_{j=1}^k q_j = \prod_{j=1}^k (1 - P_j),$$

где q_j — вероятность отказа j -го элемента;

P_j — вероятность надежной работы j -того элемента;

k — число параллельно работающих элементов.

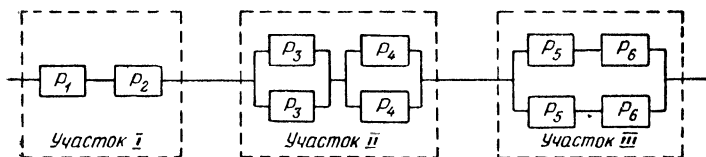


Рис. 2.6. Схема расчета надежности системы при смешанном соединении элементов

Система с параллельным соединением элементов не выйдет из строя до тех пор, пока не откажут все ее элементы.

Вероятная надежность системы P в этом случае определяется так:

$$P = 1 - Q = 1 - \prod_{j=1}^k (1 - P_j).$$

Так как обычно параллельно соединенные (резервные) элементы равнонадежны, то

$$P = 1 - (1 - P_j)^k.$$

Пример. Система имеет $k=3$, $P_j=0,9$. Определить P .

$$P = 1 - (1 - 0,9)^3 = 1 - 0,1^3 = 0,999.$$

Параллельное соединение подсистем (элементов) следует применять, когда надежность системы должна быть выше надежности подсистем (элементов).

Смешанным соединением называется совокупность систем (элементов), в которой применены различные комбинации последовательного и параллельного соединений как отдельных элементов (блоков), так и систем.

На рис. 2.6 представлена одна из возможных схем расчета надежности системы при смешанном соединении. На участке I элементы соединены последовательно, его надежность определяется $P_1 = P_1 \cdot P_2$.

На участке *II* элементы соединены параллельно-последовательно, его надежность определяется как

$$P_{II} = [1 - (1 - P_3)^k] \cdot [1 - (1 - P_4)^k] \quad \text{при} \quad P_3 = P_4,$$

$$P_{II} = [1 - (1 - P_3)^k]^n.$$

На участке *III* элементы соединены последовательно-параллельно, его надежность определяется как

$$P_{III} = 1 - (1 - P_5 \cdot P_6)^k.$$

Участки соединены между собой последовательно, поэтому надежность системы определяется как произведение надежностей отдельных участков схемы:

$$P = P_I \cdot P_{II} \cdot P_{III} = \prod_{i=1}^n P_i.$$

Пример. Определить надежность системы, элементы которой соединены, как показано на рис. 2.6 и имеют вероятную надежность работы, равную: $P_1 = P_2 = 0,97$; $P_3 = P_4 = 0,8$; $P_5 = 0,9$; $P_6 = 0,95$.

$$P_I = P_1 \cdot P_2 = 0,97 \cdot 0,97 = 0,94;$$

$$P_{II} = [1 - (1 - P_3)^k] \cdot [1 - (1 - P_4)^k] = [1 - (1 - 0,8)^2]^2 = 0,92;$$

$$P_{III} = 1 - (1 - P_5 \cdot P_6)^k = 1 - (1 - 0,9 \cdot 0,95)^2 = 0,98;$$

$$P = P_I \cdot P_{II} \cdot P_{III} = 0,94 \cdot 0,92 \cdot 0,98 = 0,848.$$

Метод структурных схем прост и удобен в тех случаях, когда элемент системы подвержен лишь одному виду отказа. В сложных системах, когда элемент подвержен двум различным видам отказа, метод структурных схем не всегда применим. Для таких случаев наиболее универсален метод *диаграмм безотказной работы*, развитый на основе алгебры логики.

Рассмотрим сущность этого метода на примере-задаче о выборе наиболее надежного вида соединения (последовательного или параллельного) двух одинаковых полупроводниковых диодов, каждый из которых подвержен двум различным видам отказов: пробоем и обрыву. На рис. 2.7 показаны две возможные принципиальные схемы соединений диодов: последовательное и параллельное.

Задано, что диоды могут отказать по пробоем с вероятностью $q'_d = 0,040$ и по обрыву с $q''_d = 0,030$. Вероятность отказа остальных двух условных элементов, включенных в схемы последовательно с диодами, принята одинаковой $q = 0,001$.

Заданные вероятности безотказной работы и отказов входящих элементов в этом случае будут:

Безотказной работы	Отказа
$P = 0,999$	$q = 0,001$
$P_d = 0,930$	$q_d = 0,070$
$P'_d = 0,960$	$q'_d = 0,040$ — по пробую
$P''_d = 0,970$	$q''_d = 0,030$ — по обрыву

Составим диаграмму и уравнения для расчета вероятности безотказной работы обеих схем.

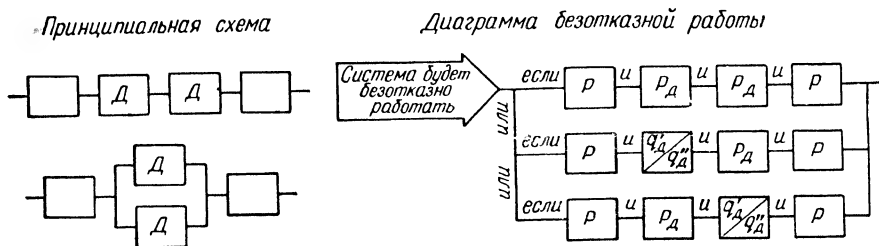


Рис. 2. 7. Расчетная диаграмма безотказной работы

Основой метода построения диаграммы безотказной работы является составление цепи логических условий, определяющих те комбинации взаимно связанных действий отдельных элементов системы, при которых обеспечивается ее безотказная работа. Эти логические условия записываются в виде диаграммы и алгебраического уравнения событий, определяющих безотказную работу системы, посредством элементарных функций алгебры логики: логического умножения, сложения и отрицания событий. Замена событий значениями вероятностей их появления приводит к выражению для расчета вероятности безотказной работы всей системы.

В рассматриваемой задаче диаграмма состоит из трех логических цепей (условий) безотказной работы:

- 1) схема последовательного соединения диодов
 - все элементы системы работают безотказно;
 - отказ по пробую (q'_d) одного из диодов при условии безотказной работы остальных элементов системы. Это логическое заключение отражается в диаграмме в виде двух аналогичных цепей.
- 2) схема параллельного соединения диодов
 - все элементы системы работают безотказно;
 - отказ по обрыву (q''_d) одного из диодов при условии безотказной работы остальных элементов системы.

На диаграмме показаны две аналогичные логические цепи, выражающие это условие.

Вероятности безотказной работы двух диодов на основе принятых исходных данных при последовательном и параллельном соединениях определяются по формулам:

$$P_{\text{пос}} = P^2 \cdot P_d^2 + P^2 \cdot q_d' \cdot P_d + P^2 \cdot P_d \cdot q_d' = P^2 [P_d'^2 - q_d'^2] = \\ = 0,999^2 [0,970^2 - 0,040^2] = 0,938;$$

$$P_{\text{пар}} = P^2 \cdot P_d^2 + P^2 q_d'' \cdot P_d + P^2 \cdot P_d \cdot q_d'' = P^2 [P_d''^2 - q_d''^2] = \\ = 0,999^2 [0,960^2 - 0,030^2] = 0,920.$$

Таким образом, в данном случае резервирование двух диодов путем параллельного соединения их менее надежно, чем при последовательном соединении.

§ 4. ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ

Мероприятия по повышению надежности могут быть проведены при проектировании, производстве и эксплуатации систем (элементов).

Обычно стоимость эксплуатации систем (элементов) значительно превышает стоимость проектирования и производства, поэтому главное усилие следует направлять на создание надежных систем и элементов. Тем не менее, и в области эксплуатации могут быть проведены важные мероприятия по повышению надежности.

При проектировании повышения надежности систем (элементов) можно добиться как схемными, так и конструктивными методами.

Схемные методы повышают надежность систем (элементов), совершенствуя их принципиальные схемы, а именно:

1. Создавая возможно более простые схемы.
2. Создавая схемы с ограниченными последствиями отказов.
3. Резервируя элементы и системы.
4. Вводя автоматический контроль.

Схемные методы являются одним из решающих факторов в создании надежных элементов и систем и при умелом их использовании позволяют получить надежные системы даже из недостаточно надежных элементов.

Создание возможно более простых схем относится к числу важнейших и наиболее трудных вопросов проектирования систем.

Одной из причин возникновения проблемы надежности является сложность схем современных систем, поэтому рациональное уменьшение числа элементов в системе (без ущерба для ее характеристик и функционирования) — определяющий фактор в процессе проектирования. Для релейно-контактных схем существует основанная на алгебре логики теория, позволяющая проектировать

сложные системы с минимально необходимым числом релейно-контактных элементов. Уменьшение сложности систем является единственным способом, при котором увеличению надежности сопутствует уменьшение веса и объема системы.

Создание схем с ограниченными последствиями отказов имеет большое значение для авиационных систем ответственного назначения (энергетические системы, системы управления и др.). Отказы таких систем делятся на две группы:

1) отказы с опасными последствиями: срыв летного задания, вынужденная посадка, авария и катастрофа;

2) отказы без опасных последствий: ухудшение условий работы экипажа, усложнение условий полета, снижение комфорта и т. п.

Схемы, выполняющие ответственные функции авиационных систем, необходимо выполнять таким образом, чтобы исключить возможность появления отказов с опасными последствиями или хотя бы уменьшить значение последствий при появлении отказа системы или ее элементов и участков.

В энергетических системах появление опасного последствия обычно связано с потерей питания ряда систем и возможной катастрофой.

Аналогичные соображения можно высказать в отношении систем автоматики авиадвигателей, автопилота и других систем, применяемых на летательных аппаратах (особенно беспилотных).

Резервирование — наиболее эффективный и перспективный схемный метод повышения надежности элементов и систем.

К конструктивным методам повышения надежности проектируемых систем относятся методы, аналогичные рассмотренным для схем (создание возможно более простых конструкций, создание конструкций с ограниченными последствиями отказов и резервирование конструктивных элементов), а также и дополнительные мероприятия: создание надежных элементов, правильный подбор их параметров и благоприятных режимов работы, унификация элементов и систем, удобство эксплуатации и ремонта.

Надежность элемента определяется в первую очередь принципом его устройства, а также зависит от его конструкции, способа изготовления и условий применения. Обычно наиболее надежными оказываются элементы, не имеющие перемещающихся деталей, накаливаемых нитей и тонких обмоток. В этом отношении перспективны полупроводниковые элементы.

Новые конструктивные элементы должны быть унифицированы и обладать повышенными характеристиками однородности в течение срока исправной работы.

Новые конструктивные разработки в значительной мере базируются на серийных конструктивных элементах, поэтому должна непрерывно повышаться и их надежность.

Элементы должны применяться только в режимах, оговоренных для них техническими условиями, так как превышение электричес-

ких, тепловых и вибрационных нагрузок значительно повышает (до десятка раз) интенсивность их отказа.

При проектировании систем должны учитываться изменение параметров материалов и деталей со временем и предусматриваться возможность ремонта в процессе эксплуатации. Встроенная система автоматического контроля должна обеспечивать контроль исправности систем и сигнализацию о месте возникновения отказа. При этом встроенные элементы контроля не должны снижать надежности основной системы.

В процессе производства надежность может повышаться в следующих направлениях:

1. Совершенствование технологии производства.
2. Автоматизация производства.
3. Тренировка элементов и систем.
4. Контроль качества продукции.
5. Наземная отработка натуральных макетов электрических систем с имитацией аварийных режимов.

В процессе эксплуатации повышение надежности может обеспечиваться:

1. Строгим соблюдением инструкций по эксплуатации, регламентным и ремонтным работам.
2. Широким использованием полуавтоматического и автоматического контроля систем на земле и в полете с прогнозированием отказов.
3. Сбором и обработкой статистических данных по опыту эксплуатации систем.
4. Связью с производством и проектными организациями.

Во многих случаях методика обслуживания — необходимое средство поддержания надежности электрических систем и их элементов на соответствующем уровне.

§ 5. МЕТОДЫ И СПОСОБЫ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ

Повышение надежности системы путем рационального применения избыточных элементов называется резервированием. Систему будем называть резервированной, если при отказе одного или нескольких элементов она продолжает нормально функционировать.

Резервирование может проводиться двумя методами: «горячим» или «холодным» резервом, отличающимися реакцией системы на появление отказа.

«Горячий» резерв — это постоянное включение резервных элементов параллельно основному в нормальном режиме работы. При возникновении отказов не происходит перерыва в работе системы до тех пор, пока исправен хотя бы один из параллельно включенных элементов.

Этот метод прост, экономичен и надежен, особенно при резервировании элементов, мелких узлов и линий питания. Так как эле-

менты соединены постоянно, то не требуется переключающих устройств и устройств сигнализации отказов.

При «холодном» резерве резервные элементы находятся в отключенном состоянии (предполагается, что интенсивность отказов их в таком режиме равняется нулю). Очередной резервный элемент включается в работу, после того как находящийся в работе вышел из строя.

Недостатки этого метода:

1. Перерыв в работе системы с момента отказа рабочего элемента до включения в работу резервного. Такое явление особенно опасно в системе энергоснабжения.

2. Необходимость переключающих устройств и устройств сигнализации, что вызывает увеличение объема, веса, стоимости и снижение надежности.

Оба метода резервирования могут применяться при различных способах соединения резервных элементов или цепей.

Существуют два основных способа резервирования: общее и раздельное.

Общее резервирование состоит в резервировании всей системы в целом. Благодаря своей простоте этот способ получил широкое распространение, особенно во вторичных энергосистемах с преобразователями постоянного тока в переменный и переменного тока в постоянный.

Раздельное резервирование состоит в резервировании системы по отдельным участкам или элементам. Любое измельчение резерва (резервирование в меньшем масштабе) является более выгодным с точки зрения увеличения надежности системы. Примером этому могут служить параллельное включение в питательную сеть фидеров генераторов и отдельных участков питательной сети, двухканальное питание и управление ответственными потребителями и т. п.

При конструировании контактных элементов может применяться внутреннее резервирование, например, независимые штоки выключателя, управляющие своими независимыми контактами, независимые контакты электромагнитного реле с независимыми обмотками управления и т. п.

Применение указанных способов и методов резервирования в первичных и вторичных энергосистемах рассматриваются в соответствующих разделах.

Однако не всегда резервное соединение систем (элементов) является достаточно эффективным. Это относится к тем случаям, когда один и тот же элемент системы подвержен нескольким различным по своей физической сущности отказам. При этом по одному типу отказов для обеспечения резервирования элемент необходимо включать в конструктивную схему последовательно, по другому — параллельно, т. е. в таких случаях каждое из указанных

соединений в отдельности может обеспечить лишь частичное резервирование. Представление об этом дают примеры, приведенные в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Элемент	Характер отказа	Схема включения, исходя из резервируемости отказа
Полупроводниковый диод	Короткое замыкание	Последовательное
	Обрыв	Параллельное
Электромеханизм системы управления	Ложный плюс	Последовательное
	Обрыв цепи управления	Параллельное

В подобных случаях применение для расчета надежности схем, состоящих из комбинаций последовательного и параллельного соединений, становится практически неудобным. При этом целесообразно выполнять расчет на основе методов алгебры логики.

Применяя резервирование, можно создать очень надежные системы и элементы. При оптимальных схемах для некоторых систем это не вызывает значительного увеличения веса и объемов, особенно в связи с широким применением малогабаритных полупроводниковых приборов и сверхминиатюрных деталей.

Продолжающийся рост сложности схем современных систем повышает требования к надежности элементов, однако снизить интенсивность отказа элементов до минимальной величины за счет конструктивных и производственных мер в короткий срок чрезвычайно трудно и поэтому резервирование на данном этапе является одним из существенных методов повышения надежности.

§ 6. ОРИЕНТИРОВОЧНЫЙ РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Ориентировочный расчет надежности энергосистемы проводится на этапе эскизного проектирования при разработке принципиальной схемы. При этом предполагают, что:

1. Все элементы работают в нормальный период времени, в нормальном режиме, известно их число, тип и интенсивность отказа.

2. Вся система функционирует в течение максимального времени одного полета.

3. К моменту начала функционирования система исправна, что достигается соответствующим контролем.

4. Отказы элементов во времени распределены по экспоненциальному закону, т. е. вероятность безотказной работы элемента определяется по формуле

$$P = e^{-\lambda_i t_i},$$

где λ_i — средняя интенсивность отказов i -го элемента;
 t_i — время работы i -го элемента.

Расчет надежности энергосистемы выполняется в следующей последовательности:

1. Определяется вероятность безотказной работы P , входящих блоков, вспомогательных элементов и проводов для заданного максимального времени полета t , при этом интенсивность отказов выбирается согласно статистическим данным эксплуатации аналогичной аппаратуры:

$$P = e^{-\lambda t}.$$

2. Вероятность безотказной работы одного канала (генератора с аппаратурой) энергосистемы P_k определяется как произведение вероятностей безотказной работы соответствующих блоков

$$P_k = P_1 \cdot P_2 \dots P_n.$$

3. Вероятность безопасной работы энергосистемы определяется вероятной безопасностью работы входящих каналов.

Надежность системы электроснабжения рассматривается в смысле обеспечения безопасности полета. Под безопасностью полета понимается способность энергосистемы при возможных внешних повреждениях обеспечивать питанием потребители, от работы которых зависит жизнь участников полета и выполнение задания. Нарушение безопасности приводит к опасной ситуации.

В энергосистеме с параллельно работающими каналами обеспечивается n -кратное дублирование, поэтому даже одновременный выход из строя $n-1$ каналов не ведет к отказу в питании основных потребителей, если располагаемая мощность одного канала достаточна. Опасная ситуация наступает только при выходе из строя всех n каналов.

Вероятность безопасной работы энергосистемы P_c (наличие питания на главных распределительных шинах) при этом определяется выражением

$$P_c = 1 - Q_c = 1 - Q_k^n = 1 - (1 - P_k)^n.$$

Единичный отказ в одном из каналов не ведет к появлению опасной ситуации. Однако в зависимости от характера отказа (например, к. з. на центральной шине) и схемы объединения каналов на параллельную работу опасная ситуация может появиться и в этом случае. Опасная ситуация может возникнуть и в случае двойных отказов при определенном их сочетании. Например,

отказ элемента системы регулирования напряжения и отказ элемента в соответствующем органе защиты. В некоторых энергосистемах разрушение и заклинивание подшипников генератора тоже приводит к опасной ситуации. В этом случае вследствие жесткой связи генератора с авиадвигателем механическое трение частей генератора может вызвать пожар на летательном аппарате.

Вероятность возникновения отказа системы $Q_{0.c}$, вызванная определенным двойным отказом блоков, определяется как

$$Q_{0.c} = Q_1 \cdot Q_2,$$

где, например, Q_1 — вероятность появления отказа в блоке регулятора напряжения;

Q_2 — вероятность появления отказа в блоке защиты.

Доля двойных отказов, приводящих к опасной ситуации, определяется отношением

$$\beta = \frac{Q_{c.c}}{Q_k} = \frac{Q_{0.c}}{1 - P_k}.$$

Вероятность отсутствия опасной ситуации для n -канальной системы энергоснабжения определяется по формуле

$$P_c = (1 - \beta Q_k)^n - (1 - \beta)^n Q_k^n,$$

где Q_k — вероятность отказа одного из n -каналов;

βQ_k — вероятность двойного отказа, приводящего к опасной ситуации.

Согласно расчету надежности энергосистемы уточняется состав и типы элементов, режимы их работы и схемы соединений и окончательно определяется оптимальный вариант принципиальной схемы энергосистемы.

Рассмотрим примеры ориентировочного расчета надежности энергосистем постоянного и переменного тока.

Пример 1*. Расчет надежности энергосистемы постоянного тока.

Расчет надежности фидера генератора. Расчетная схема фидера генератора, показанная на рис. 2.8, состоит из последовательного соединения элементов. Если из статистики известна интенсивность отказа элементов, то, применяя экспоненциальный закон, можно определить их надежность.

1. Предохранитель 1 шт., $\lambda_1 = 0,01 \cdot 10^{-3}$.

$$P_1 = e^{-\lambda_1 t} = 2,73^{-t \cdot 0,01 \cdot 10^{-3}}.$$

2. ДМР: реле 6 шт., $\lambda_{21} = 0,02 \cdot 10^{-3}$; соединение пайки 35 шт., $\lambda_{22} = 0,0001 \times 10^{-3}$; соединение штепсельное 7 шт., $\lambda_{23} = 0,0005 \cdot 10^{-3}$.

* Двойной отказ в одном канале, приводящий к опасной ситуации, в данном примере не рассматривается.

Соединение элементов последовательное.

$$P_2 = e^{-t(6 \cdot 0,02 + 35 \cdot 0,0001 + 7 \cdot 0,0005) \cdot 10^{-3}} = 2,73 \cdot 10^{-3}.$$

3. Выключатель 1 шт., $\lambda_3 = 0,01 \cdot 10^{-3}$.

$$P_3 = e^{-t \cdot 0,01 \cdot 10^{-3}}.$$

4. Регулятор напряжения: угольный столб 1 шт., $\lambda_{41} = 0,08 \cdot 10^{-3}$, сопротивление 4 шт., $\lambda_{42} = 0,01 \cdot 10^{-3}$, вентили 4 шт., $\lambda_{43} = 0,01 \cdot 10^{-3}$, обмотки электромагнитов 4 шт., $\lambda_{44} = 0,0015 \cdot 10^{-3}$, соединение пайкой 25 шт., $\lambda_{45} = 0,0001 \cdot 10^{-3}$, соединение штепсельное 5 шт., $\lambda_{46} = 0,0005 \cdot 10^{-3}$.

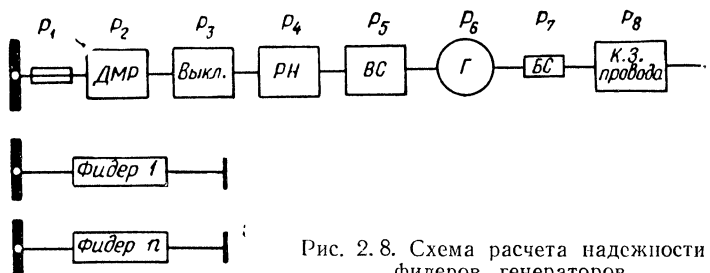


Рис. 2. 8. Схема расчета надежности фидеров генераторов

Соединение элементов последовательное.

$$P_4 = e^{-t(0,08 + 4 \cdot 0,01 + 4 \cdot 0,01 + 4 \cdot 0,0015 + 25 \cdot 0,0001 + 5 \cdot 0,0005) \cdot 10^{-3}}.$$

$$P_4 = e^{-t \cdot 0,171 \cdot 10^{-3}}.$$

5. Выносное сопротивление $\lambda_5 = 0,12 \cdot 10^{-3}$.

$$P_5 = e^{-t \cdot 0,12 \cdot 10^{-3}}.$$

6. Генератор 1 шт. $\lambda_6 = 0,2 \cdot 10^{-3}$.

$$P_6 = e^{-t \cdot 0,2 \cdot 10^{-3}}.$$

7. Балластное сопротивление 1 шт., $\lambda_7 = 0,001 \cdot 10^{-3}$.

$$P_7 = e^{-t \cdot 0,001 \cdot 10^{-3}}.$$

8. Короткое замыкание. Длина 5 м, $\lambda_8 = 0,0001 \cdot 10^{-3}$ для 1 м.

$$P_8 = e^{-t \cdot 5 \cdot 0,0001 \cdot 10^{-3}} = e^{-t \cdot 0,0005 \cdot 10^{-3}}.$$

Надежность фидера генератора определяется произведением надежностей входящих элементов.

$$P_K = P_{18} = P_1 P_2 P_3 P_4 P_5 P_6 P_7 P_8 = e^{-t(0,01 + 0,127 + 0,01 + 0,171 + 0,12 + 0,2 + 0,001 + 0,0005) \cdot 10^{-3}}$$

$$P_K = e^{-t \cdot 0,6395 \cdot 10^{-3}}.$$

Таким образом, вероятная надежность определяется:

За 10 час работы $P_K = 0,9931$.

За 200 час работы $P_K = 0,7447$.

При параллельном включении в сеть n генераторов.

Надежность энергоснабжения определяется выражением

$$P_c = 1 - (1 - P_K)^n.$$

Например, при $n=2$.

За 10 час работы $P_c = 1 - (1 - 0,9931)^2 = 0,9999525$.

За 200 час работы $P_c = 1 - (1 - 0,7447)^2 = 0,935$.

Однако следует иметь в виду, что питание всех потребителей при отказе фидеров генераторов обеспечивается до момента полного использования резерва мощности, а при дальнейшем отказе фидеров необходимо соответственно отключать потребители.

Расчет надежности энергоснабжения РУ. Проведем сравнительный расчет надежности энергоснабжения РУ при различных схемах питающей сети.

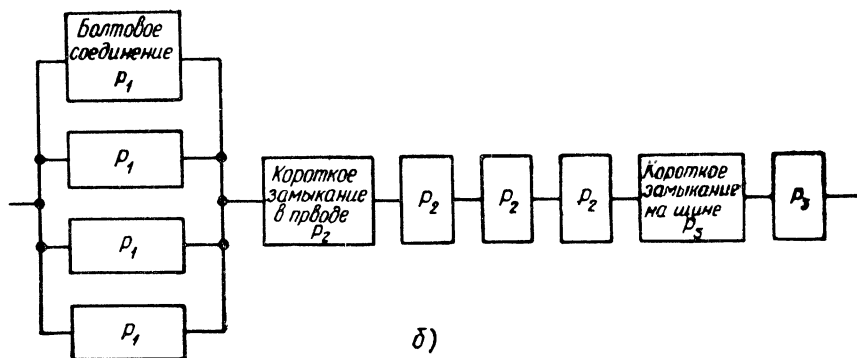
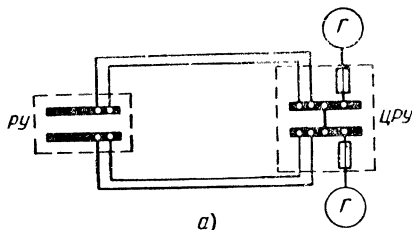


Рис. 2.9. Схема расчета надежности незащищенной линии питания РУ:

а—конструктивная схема; б—расчетная схема

Незащищенные линии питания РУ представлены на рис. 2.9.

Схема включает болтовое соединение с $\lambda_1 = 0,0001 \cdot 10^{-3}$, короткое замыкание в проводе с $\lambda_2 = 0,0001 \cdot 10^{-3}$ для 1 м и короткое замыкание на распределительной шине $\lambda_3 = 0,001 \cdot 10^{-3}$. Надежность входящих элементов за 1000 час работы определяется:

$$P_1 = e^{-t \cdot 2 \cdot 0,0001 \cdot 10^{-3}} = e^{-t \cdot 0,0002 \cdot 10^{-3}} = 0,9986;$$

$$P_2 = e^{-t \cdot 25 \cdot 0,0001 \cdot 10^{-3}} = e^{-t \cdot 0,0025 \cdot 10^{-3}} = 0,9962;$$

$$P_3 = e^{-t \cdot 0,001 \cdot 10^{-3}} = 0,9982.$$

Общая надежность

$$P = [1 - (1 - P_1)^4] P_2^4 \cdot P_3^2 = 0,9868.$$

Линии питания с односторонней защитой РУ представлены на рис. 2.10.

В схему входят те же элементы, что и в схеме рис. 2.9 и, кроме того, предохранитель с $\lambda_2=0,01 \cdot 10^{-3}$.

Надежность входящих элементов за 1000 час работы определяется:

$$P_1 = e^{-t \cdot 3 \cdot 0,0001 \cdot 10^{-3}} = e^{-t \cdot 0,0003 \cdot 10^{-3}};$$

$$P_2 = e^{-t \cdot 0,01 \cdot 10^{-3}};$$

$$P_{12} = P_1 \cdot P_2 = e^{-10^3(0,0003 + 0,01) \cdot 10^{-3}} = e^{-0,0103} = 0,9890;$$

$$P_1 = 1 - (1 - P_{12})^2 = 1 - (1 - 0,989)^2 = 0,999879;$$

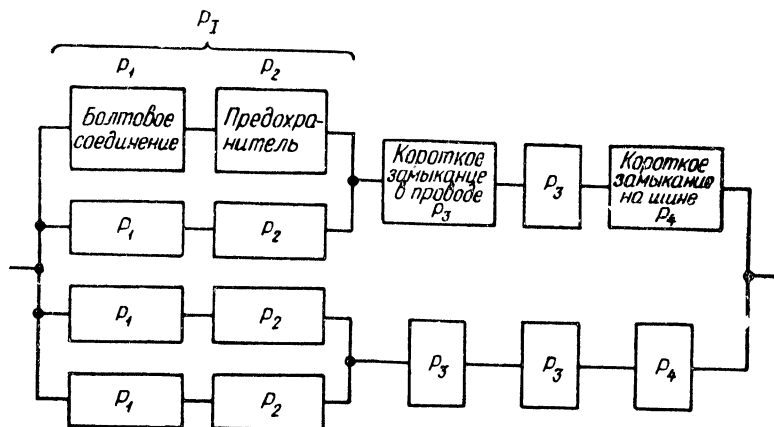
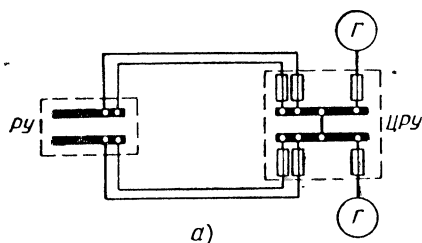
$$P_3 = e^{-10^3 \cdot 0,0025 \cdot 10^{-3}} = e^{-0,0025} = 0,9962;$$

$$P_4 = e^{-10^3 \cdot 0,001 \cdot 10^{-3}} = e^{-0,001} = 0,9982;$$

$$P_{1л} = P_1 \cdot P_3^2 \cdot P_4 = 0,999879 \cdot 0,9962^2 \cdot 0,9982 = 0,99.$$

Общая надежность

$$P = 1 - (1 - P_{1л})^2 = 1 - (1 - 0,99)^2 = 0,9999.$$



б)

Рис. 2.13. Схема расчета надежности линии питания с односторонней защитой:

а—конструктивная схема; б—расчетная схема

Линии питания с двусторонней защитой представлены на рис. 2.11. Надежность входящих элементов за 1000 час работы определяется:

$$P_{13} = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 = e^{-10^3(4 \cdot 0,0001 + 2 \cdot 0,01 + 25 \cdot 0,0001)} \cdot 10^{-3} = e^{-0,0229} = 0,9772;$$

$$P_I = 1 - (1 - P_{13})^4 = 1 - (1 - 0,9772)^4 = 0,99999973 \approx 1;$$

$$P_4 = e^{-10^3 \cdot 0,001 \cdot 10^{-3}} = e^{-0,001} = 0,9982;$$

$$P_{II} = 1 - (1 - P_4)^2 = 1 - (1 - 0,9982)^2 = 0,99999675.$$

Общая надежность

$$P = P_I \cdot P_{II} = 0,99999675.$$

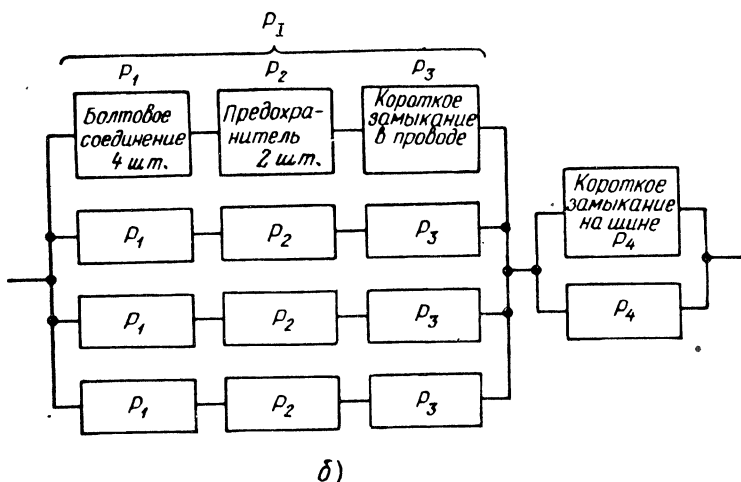
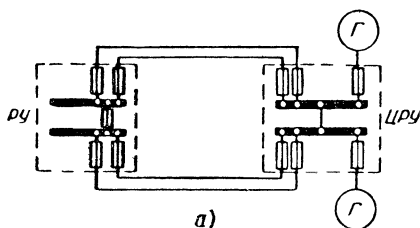


Рис. 2.11. Схема расчета надежности линии питания с двусторонней защитой:

а—конструктивная схема; б—расчетная схема

Из расчета видно, что наиболее надежной схемой питания РУ является кольцевая 4-канальная система с двусторонней защитой линий питания.

Пример 2*. Расчет надежности энергосистемы переменного тока.

Предположим, из статистики известна интенсивность отказов блоков, входящих в энергосистему:

— для элементов регулирования напряжения и частоты, $\lambda = 2 \cdot 10^{-7}$ 1/час;

- для элементов блока защиты $\lambda = 1 \cdot 10^{-7} \text{ 1/час}$;
- для бесконтактного генератора $\lambda = 2,9 \cdot 10^{-5} \text{ 1/час}$;
- для привода постоянной скорости $\lambda = 45,2 \cdot 10^{-5} \text{ 1/час}$.

Определить вероятность отсутствия опасной ситуации для четырехканальной энергосистемы за 10-часовой полет.

Вероятность безотказной работы блока за 10-часовой полет определяется по формуле экспоненциального закона.

1. Для регулятора напряжения, состоящего из 53 элементов,

$$P_{p.n} = e^{-2 \cdot 10^{-7} \cdot 53 \cdot 10} = 0,99989.$$

2. Для регулятора частоты, состоящего из 41 элемента,

$$P_{p.ч} = e^{-2 \cdot 10^{-7} \cdot 41 \cdot 10} = 0,99993.$$

3. Для блока защиты, состоящего из 245 элементов,

$$P_{б.з.у} = e^{-1 \cdot 10^{-7} \cdot 245 \cdot 10} = 0,99976.$$

4. Для бесконтактного генератора

$$P_{г} = e^{-2,9 \cdot 10^{-5} \cdot 1 \cdot 10} = 0,99972.$$

5. Для привода постоянной скорости

$$P_{пр} = e^{-45,2 \cdot 10^{-5} \cdot 1 \cdot 10} = 0,9955.$$

Вероятность безотказной работы одного канала энергосистемы определяется как

$$P_k = P_{пр} \cdot P_{г} \cdot P_{p.n} \cdot P_{p.ч} \cdot P_{б.з.у} = 0,9948.$$

Вероятность безотказной работы четырехканальной системы без учета деленного сочетания двойного отказа составит

$$P_c = 1 - (1 - P_k)^4 = 1 - (1 - 0,9948)^4 = 0,99999999269.$$

Вероятность возникновения отказов системы, вызванных определенным сочетанием двойных отказов блоков регулирования напряжения и защиты, будет

$$Q_{с} = Q_{p.n} \cdot Q_{б.з.у} = 48 \cdot 10^{-6} \cdot 50 \cdot 10^{-6} = 24 \cdot 10^{-10}.$$

Доля двойных отказов, приводящих к опасной ситуации,

$$\beta = \frac{Q_{сс}}{1 - P_k} = \frac{24 \cdot 10^{-10}}{1 - 0,9948} = 4,62 \cdot 10^{-7}.$$

Вероятность отсутствия опасной ситуации для четырехканальной системы определяется

$$P_c = (1 - \beta Q_k)^4 - (1 - \beta) \cdot Q_k^4 = (1 - 4,62 \cdot 10^{-7} \cdot 5,2 \cdot 10^{-3})^4 - (1 - 4,62 \cdot 10^{-7})^4 \cdot 0,0052^4 = 0,999998977.$$

* Отказ вспомогательных элементов, проводов и надежность энергоснабжения вторичных распределительных устройств в данном примере не рассматривается.

Глава I

**СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ**

**§ 1. ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И КЛАССИФИКАЦИЯ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ**

Электрическая сеть является связующим звеном между источниками энергии и потребителями и состоит из следующих элементов:

1. Электрических проводов, предназначенных для передачи электроэнергии от источников к потребителям.

2. Распределительных устройств (РУ), предназначенных для приема энергии от источников и распределения ее между потребителями.

3. Аппаратуры защиты источников энергии, потребителей и проводов от коротких замыканий и перегрузок.

4. Коммутационной аппаратуры, предназначенной для управления.

5. Аппаратуры контроля источников, потребителей и распределительных устройств.

6. Устройств против помех работе радиотехнического и приборного оборудования.

7. Аппаратуры защиты статического электричества.

8. Монтажных и установочных деталей.

Электрические сети классифицируются по ряду признаков:

По назначению они делятся на питательные и распределительные. Блок-схема сети приведена на рис. 1. 1.

Питательные сети передают электрическую энергию от источников к питательным пунктам — первичным и вторичным распределительным устройствам (ЦРУ и РУ).

Распределительные сети передают электрическую энергию от питательных пунктов (ЦРУ и РУ) к потребителям.

По роду тока и напряжению электрические сети подразделяются на пять групп:

1. Сети постоянного тока низкого напряжения (47, 27 и 12 в).
2. Сети постоянного тока высокого напряжения (112 в и выше).
3. Сети трехфазного переменного тока высокого напряжения (200/115 в и выше).
4. Сети однофазного переменного тока высокого напряжения (115; 200 в и выше).

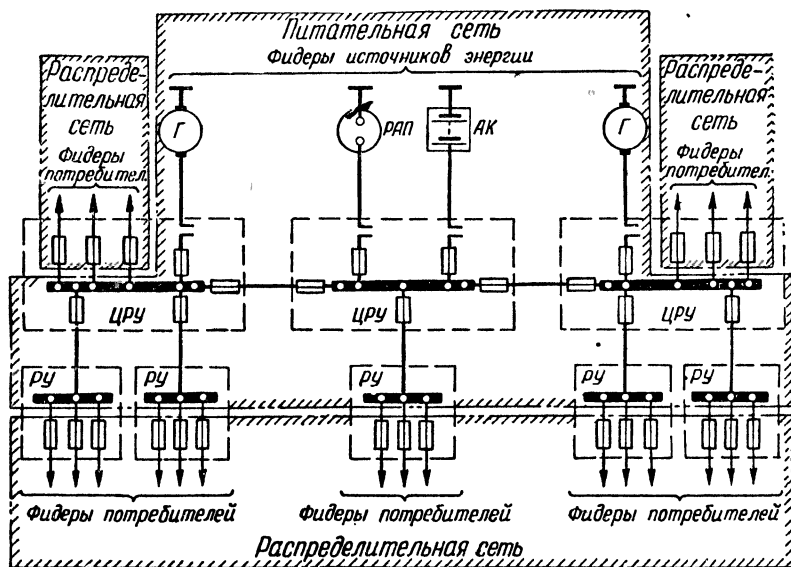


Рис. 1.1. Блок-схема питательной и распределительной сетей

5. Сети трехфазного и однофазного переменного тока низкого напряжения (47, 36, 27 и 12 в).

Сети постоянного тока низкого напряжения и трехфазного переменного тока высокого напряжения получили преимущественное распространение в первичных энергосистемах. Во вторичных энергосистемах применяются в основном сети трех- и однофазного переменного тока, а также постоянного тока низкого напряжения. Сети постоянного тока высокого напряжения в настоящее время применяются редко.

По системе передачи электроэнергии:

1. Однопроводные.
2. Двухпроводные.
3. Трехпроводные.
4. Четырехпроводные.

По системе распределения электроэнергии:

1. Централизованные.

2. Смешанные.
3. Децентрализованные.
4. Раздельные

По конфигурации:

1. Разомкнутые (радиальные и магистральные).
2. Замкнутые (радиальные, магистральные, сетчатые и кольцевые).

3. Комбинированные.

По защите:

1. Защищенные.
2. Незащищенные.

По канальности:

1. Одноканальные.
2. Многоканальные.

В основу наименования электрической сети обычно кладут конфигурацию, канальность, защиту и назначение и как поясняющие элементы род тока, напряжение, систему передачи и распределения.

Например: кольцевая многоканальная защищенная питательная сеть постоянного тока напряжением 27 в.

§ 2. ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

К электрической сети предъявляются общие технические требования, рассмотренные для систем электроснабжения. Отметим некоторые особенности этих требований и пути их реализации.

1. Электрическая сеть в нормальных и аварийных условиях эксплуатации летательного аппарата должна обеспечивать высокую надежность передачи электрической энергии от источников к потребителям.

2. При отказе отдельных источников энергии, обрыве или коротком замыкании проводов питательная сеть должна сохранять работоспособность и передавать энергию удовлетворительного качества.

3. Электрическая сеть должна иметь минимальный полетный вес и обеспечивать высокое качество передачи электрической энергии от источников к потребителям.

Рассмотрим основные пути реализации указанных требований. *Высокая надежность, безотказность работы и живучесть* электрической сети могут быть достигнуты:

— многократным кольцеванием питательной сети, т. е. созданием главного энергетического кольца с первичными ЦРУ и вторичного энергетического кольца с вторичными РУ;

— многоканальностью питающих линий в главном и вторичном энергетических кольцах;

— двусторонней защитой питающих линий в главном и вторичных энергетических кольцах;

— селективностью срабатывания защиты при коротком замы-

кании в питающих линиях, т. е. автоматическим отключением поврежденной линии и сохранением работоспособности остальной сети;

- селективным срабатыванием защиты при коротком замыкании распределительных шин ЦРУ и РУ, т. е. автоматическим отключением поврежденной шины и сохранением работоспособности остальной сети;

- прокладкой питающих линий энергетических колец по двум бортам;

- многосторонним питанием главного энергетического кольца. Количество точек питания должно соответствовать количеству источников энергии;

- автоматическим переключением ответственных потребителей с распределительной шины, вышедшей из строя, на нормально работающую;

- автоматическим переключением ответственных потребителей на аварийную сеть при выходе из строя основной питательной сети;

- обеспечением минимального разброса напряжений по распределительным шинам;

- автоматическим и селективным отключением потребителя от распределительной шины при коротком замыкании в его фидере и перегрузках;

- монтажом сети по кратчайшим маршрутам с минимальным количеством соединений и переходных сопротивлений в контактах.

Существенное снижение *полетного веса* электрической сети может быть достигнуто:

- применением переменного тока напряжением 200/115 в вместо постоянного напряжением 27 в;

- однопроводной системой передачи электрической энергии вместо двухпроводной;

- применением алюминиевых проводов вместо медных;

- улучшением качества изоляции;

- подключением мощных потребителей к распределительным устройствам, близлежащим к источникам энергии;

- правильным выбором проводов из условий нагрева и допустимой потери напряжения.

Качество электрической энергии зависит от выбора источников энергии, системы передачи и распределения, конфигурации и защиты питательной сети. Основными мероприятиями по повышению качества снабжения электроэнергией являются:

- параллельная работа всех источников энергии на главную питательную сеть;

- многоканальная и кольцевая конфигурация питательных сетей;

- питание мощных потребителей от распределительных устройств, близлежащих к источникам энергии;

- присоединение рабочей обмотки регуляторов напряжения к шинам ЦРУ;

— монтаж сети по кратчайшим маршрутам с минимальным количеством соединений и переходных сопротивлений в контактах;

— селективность и быстродействие защиты.

Для борьбы с паразитными магнитными и электрическими полями экранируются некоторые провода и отдельные агрегаты, устанавливаются электрические фильтры и разрядники, надежно металлизированы между собою отдельные элементы корпуса летательного аппарата и т. п.

§ 3. СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

На летательных аппаратах с энергосистемами постоянного тока получили распространение две системы передачи электрической энергии — однопроводная и двухпроводная.

В однопроводной системе передачи (рис. 1. 2) к каждому источнику и потребителю подводится лишь плюсовой провод. В качестве минусового провода используется металлический корпус летательного аппарата. При этом следует иметь в виду, что по корпусу л. а. протекают значительные токи (тысячи ампер), поэтому отдельные элементы его конструкции должны иметь надежный контакт.

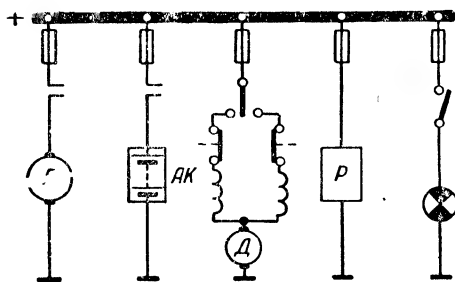


Рис. 1. 2. Схема однопроводной системы передачи электрической энергии постоянного тока

Преимущества. 1. Корпус имеет высокую проводимость, практически можно учитывать потери напряжения только в плюсовом проводе.

2. Вес проводов и сетевых устройств в сравнении с двухпроводной системой сокращается до 40%, а габариты сетевых устройств до 15—20%.

3. Значительно упрощается монтаж и эксплуатация сети.

Недостатки. 1. Соединение любого провода с корпусом является коротким замыканием электрической сети, поэтому повышаются требования к электроизоляции.

2. Попадание постороннего плюса в цепь потребителя приводит к произвольному его срабатыванию.

Однопроводная сеть нашла широкое применение на всех видах летательных аппаратов.

В двухпроводной системе передачи электрической энергии (рис. 1. 3) к каждому источнику и потребителю подходят прямой и обратный провода.

Аппаратура защиты и управления, как правило, устанавливается в плюсовых цепях. Аппаратура защиты в минусовых цепях предусматривается только для агрегатов, имеющих обратный провод, соединенный с массой.

Преимущества. 1. При замыкании любого провода на корпус система сохраняет нормальную работоспособность и выходит из строя только при одновременном замыкании на корпус двух проводов.

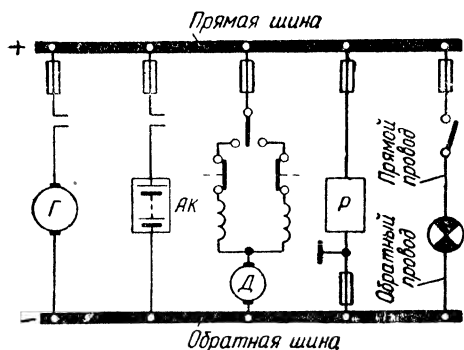


Рис. 1.3. Схема двухпроводной системы передачи электрической энергии постоянно-го тока

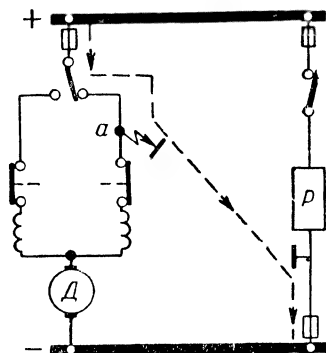


Рис. 1.4. Отказ фидера радио при к. з. провода силового электромеханизма в двухпроводной системе

2. Малая опасность для обслуживающего персонала, так как прикосновение к одному, даже оголенному проводу в такой сети не опасно.

Однако эти два преимущества справедливы только для двухпроводных систем, в которых отсутствуют потребители (в основном радиооборудование), имеющие соединение обратного провода с массой.

3. Малый уровень помех, так как в основном прямой и обратный провода представляют бифиляр.

Недостатки. 1. При одинаковых величинах потерь напряжения в двухпроводной системе сечение проводов в два, а вес в четыре раза больше, чем в однопроводной.

2. Наличие в двухпроводной системе передачи потребителей с заземленным на массу обратным проводом может привести к дополнительным аварийным режимам (рис. 1.4 и 1.5).

При включенном силовом механизме короткое замыкание его плюсового провода на массу (к. з. в точке *а*, см. рис. 1.4) вызывает протекание тока короткого замыкания через минусовой провод радиоаппаратуры, имеющей заземление на массу. Путь тока показан пунктиром. Так как провода и предохранитель силового электромеханизма рассчитываются на большой ток, а провода указан-

ной радиоаппаратуры на малые токи, то короткое замыкание в первую очередь приведет к воспламенению изоляции или перегоранию провода в минусовой цепи радиоаппаратуры. Это вызывает необходимость установки предохранителей в минусовых проводах потребителей, имеющих заземление.

При перегорании предохранителя в минусовой заземленной цепи радиоаппаратуры и одновременном коротком замыкании на массу плюсового провода электромеханизма (к. з. в точке δ), мощность которого соизмерима с мощностью радиоаппаратуры, произойдет ложное срабатывание электро-механизма, как показано на рис. 1.5.

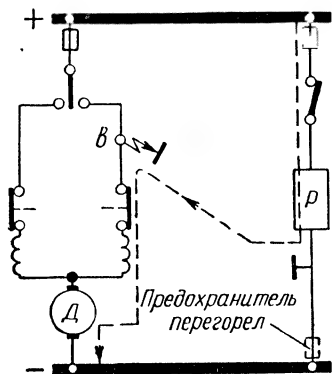


Рис. 1.5. Ложное срабатывание электромеханизма при к. з. его провода в двухпроводной системе

Двухпроводная система передачи электрической энергии имела исключительное распространение на ранней стадии развития электрооборудования летательных аппаратов, когда протяженность электрических сетей была невелика, а корпус летательного аппарата — деревянной или смешанной конструкции.

В отдельных случаях применяется двухпроводная система с общим минусом, в который к каждому потребителю также подводятся два провода: один от плюсовой шины, другой от объединенного минусового провода. В объединенных минусовых проводах токи всех присоединенных к ним потребителей никогда не протекают одновременно и, следовательно, сечение объединенного провода можно брать меньше, чем сумма сечений всех отдельных минусовых проводов потребителей. Двухпроводная сеть с объединенным обратным проводом является логическим переходом от обычной двухпроводной сети к однопроводной.

На современных летальных аппаратах двухпроводная система передачи находит применение только на отдельных участках сети, когда минусовому проводу невозможно обеспечить надежный контакт с корпусом. Главным образом это относится к электрическим агрегатам, расположенным на двигателе. Минусовой провод в этом случае доводится до противопожарной перегородки.

При однопроводной системе передачи электрической энергии особенно ответственными потребителями можно управлять по двухпроводной системе, что практически исключает возможность их ложного срабатывания.

На беспилотных летательных аппаратах для повышения живучести и надежности электрических систем, также целесообразно применять двухпроводные системы передачи электрической энергии.

§ 4. СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

На летательных аппаратах с энергосистемами переменного тока системы передачи электрической энергии и особенности их эксплуатации определяются числом фаз и представлены однофазной и трехфазной системами передач.

Системы передачи однофазного переменного тока

Однофазный переменный ток передается двумя системами: однопроводной и двухпроводной, которые обладают преимуществами и недостатками, отмеченными в § 3.

Система передачи трехфазного переменного тока

Электрическая энергия трехфазного переменного тока в зависимости от типа генератора и особенностей эксплуатации летательного аппарата может передаваться следующими системами: двухпроводной с заземлением одной фазы, трехпроводной, трехпроводной с заземлением силовой нейтрали и четырехпроводной.

Двухпроводная система передачи возможна, если источником электроэнергии является трехфазный генератор без выведенного силового нуля. При этом в качестве третьего провода используется корпус л. а. (рис. 1.6).

Преимущества. Снижение веса сети благодаря использованию корпуса л. а. в качестве третьего провода.

Недостатки. 1. Вследствие меньшего сопротивления корпуса л. а. создается асимметрия линейных напряжений у потребителей, возрастающая по мере удаления потребителя от источника энергии.

2. При одном и том же линейном напряжении в двухпроводной сети напряжение между корпусом и линейным проводом в $\sqrt{3}$ раза больше, чем в системе с заземленным нулевым проводом, что увеличивает опасность поражения током.

3. При обрыве одного из линейных проводов часть однофазных потребителей оказывается соединенной последовательно, что приводит к ненормальному режиму их работы, а трехфазные потребители получают однофазное питание.

Трехпроводная система передачи применяется в системах, где источником электрической энергии является трехфазный генератор переменного тока с изолированной нейтралью (рис. 1.7).

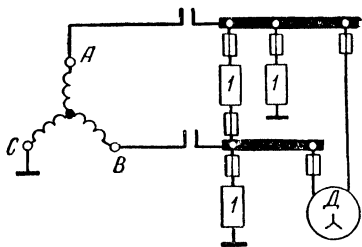


Рис. 1.6. Схема двухпроводной системы передачи трехфазного переменного тока с заземлением одной фазы

Трехфазные потребители питаются по трехпроводной схеме, а однофазные — по двухпроводной.

Преимущества. 1. При трехфазных или симметрично распределенных однофазных нагрузках практически отсутствует асимметрия линейных напряжений.

2. Снижается вероятность появления коротких замыканий через корпус летательного аппарата.

3. Изоляция нейтрали препятствует протеканию гармоник тока, кратных трем.

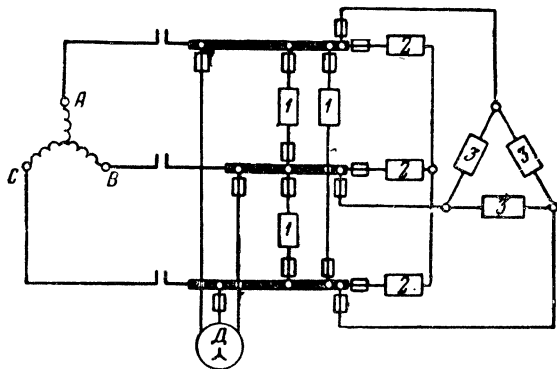


Рис. 1.7. Схема трехпроводной системы передачи трехфазного переменного тока с изолированной силовой нейтралью

Недостатки. 1. При замыкании одного провода на массу (скрытое к. з.):

а) увеличивается опасность прикосновения к проводам других фаз;

б) изменяются потенциальные диаграммы в электронной аппаратуре, питаемой от секции с замкнутой фазой, что может вызвать нарушение работы этой аппаратуры;

в) возникает перенапряжение на конденсаторах фильтров;

г) требуется повысить расчетное амплитудное напряжение изоляции оборудования до 585 в.

2. Создается потенциальная опасность короткого замыкания через корпус.

3. Не обеспечивается быстрая сигнализация и отыскание скрытых коротких замыканий на массу для потребителей, включаемых только в полете.

4. Для питания однофазных потребителей с напряжением 115 в требуется установка большого количества мелких трансформаторов.

5. Для подключения однофазных потребителей требуется двухполюсная коммутационная аппаратура, так как при подключении через однополюсную аппаратуру возможны ложные запуски.

6. При неравенстве сопротивлений однофазных потребителей, соединенных в звезду, возможно повышение фазного напряжения на отдельных из них.

Трехпроводная система передачи с заземленной силовой нейтралью возможна, если источником электрической энергии является трехфазный синхронный генератор с выведенным силовым нулем. В качестве нулевого провода используется корпус летательного аппарата (рис. 1. 8).

Трехфазные потребители питаются по трехпроводной схеме, а для потребителей, имеющих выведенный нуль, в качестве четвертого провода используется корпус летательного аппарата.

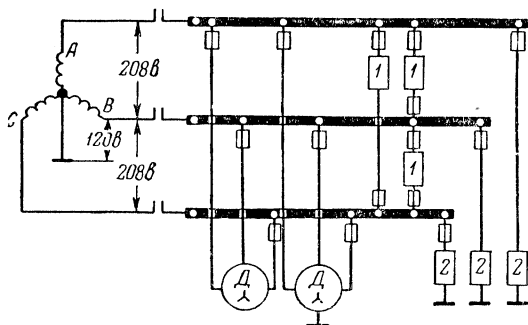


Рис. 1.8. Схема трехпроводной системы передачи трехфазного переменного тока с заземленной силовой нейтралью

Преимущества 1. При трехфазных нагрузках и симметричном распределении однофазных нагрузок по фазам практически отсутствует асимметрия линейных напряжений.

2. Наличие двух рабочих напряжений $U_{\text{ф}}$ и $U_{\text{л}} = \sqrt{3}U_{\text{ф}}$ обеспечивает возможность включения однофазных потребителей как на линейное, так и на фазное напряжение генераторов без трансформаторов.

3. Увеличивается надежность и несколько снижается вес проводов в сравнении с четырехпроводной системой.

4. Упрощается работа автоматов защиты генераторов.

5. Повышается живучесть электросистемы, так как трехфазные электродвигатели при повреждении одного или двух проводов могут кратковременно работать как двухфазные или как однофазные.

Недостатки 1. Плохая форма кривой фазного напряжения, обусловленная 3-й гармоникой в напряжении. В современных генераторах этот недостаток практически устранен.

2. Замыкание любого линейного провода на массу вызывает короткое замыкание.

Трехфазная система с заземленной силовой нейтралью имеет ряд преимуществ перед другими системами передач и распределения и рекомендуется для применения на л. а. в качестве основной системы.

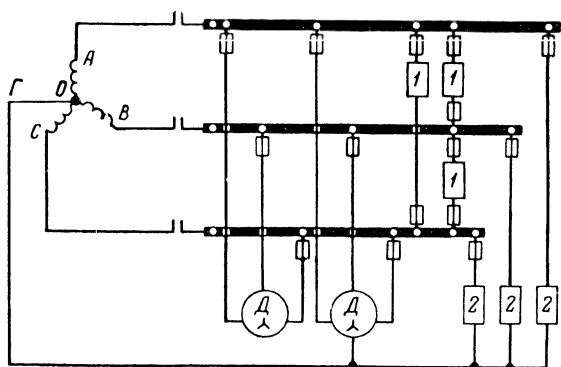


Рис. 1.9. Схема четырехпроводной системы передачи трехфазного переменного тока

Четырехпроводная система передачи возможна, если источником электрической энергии является трехфазный синхронный генератор с выведенным силовым нулем (рис. 1.9).

Преимущества. Система обладает достоинствами, отмеченными в пп. 1 и 2, 4 и 5 для трехпроводной системы с заземленной силовой нейтралью, и в п. 2 для трехпроводной системы.

Недостатки. Система обладает недостатками, отмеченными в пп. 1, 2 и 3 и 5 для трехпроводных систем.

§ 5. СИСТЕМЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

В зависимости от назначения и размеров летательного аппарата применяются четыре системы распределения электрической энергии: централизованная, смешанная, децентрализованная и раздельная.

Принципы работы систем различны, следовательно, различны качества энергоснабжения и методы расчета.

Указанные системы в равной степени распространяются на системы энергоснабжения постоянным и переменным током. Первые три системы предусматривают параллельное включение источников энергии и получили широкое распространение в первичных системах энергоснабжения.

На летательных аппаратах могут применяться одновременно все четыре системы распределения.

Централизованная система распределения электрической энергии (рис. 1.10) характеризуется тем, что вся энергия от источников питания подается к одному цент-

ральному распределительному устройству (ЦРУ) и затем от шины ЦРУ распределяется между отдельными потребителями.

Защита фидеров источников энергии и потребителей, управление и контроль источников энергии сосредотачивается на ЦРУ, которое располагается в непосредственной близости от экипажа. Аппаратура управления потребителями, как правило, располагается на соответствующих функциональных щитках и пультах.

Преимущества. 1. При выходе из строя отдельных источников энергии потребители продолжают получать нормальное питание за счет резерва мощности генераторов.

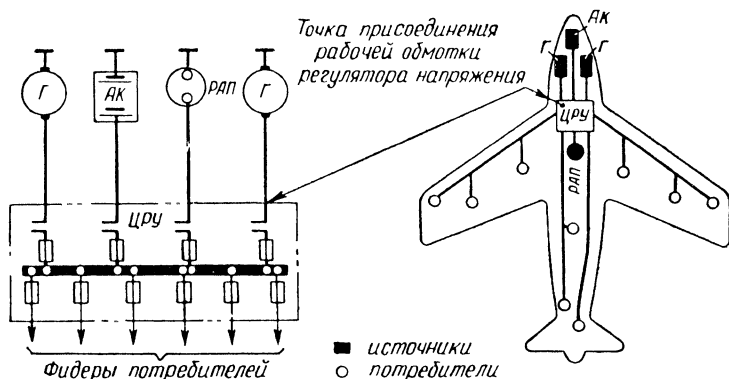


Рис. 1.10. Централизованная система распределения электрической энергии

2. Напряжение на шине ЦРУ поддерживается постоянным в пределах точности работы регуляторов напряжения, если их рабочие обмотки подключаются непосредственно на шину ЦРУ.

3. Фидеры всех потребителей имеют потенциал, равный потенциалу шины ЦРУ и, следовательно, напряжение на клеммах потребителей определяется только изменением тока, потребляемого данным агрегатом.

4. При соответствующем выборе сечения проводов фидеров различных потребителей на клеммах агрегатов можно получить любое необходимое напряжение, оптимальное для данного агрегата.

5. Удобство эксплуатации, проверки и отыскания неисправностей электрической сети.

Недостатки. 1. Малая живучесть энергосистемы, так как при коротком замыкании на шине ЦРУ все потребители теряют питание.

2. Громоздкость ЦРУ, так как на нем сосредотачивается аппаратура защиты всех фидеров источников энергии и потребителей, а также аппаратура контроля и управления источниками электрической энергии.

3. Большой вес электрической сети вследствие значительной длины фидеров источников энергии и потребителей.

Наибольшее распространение централизованная система распределения электрической энергии получила на легких летательных аппаратах. При увеличении числа источников и потребителей централизованная система распределения становится громоздкой и тяжелой. Однако она с успехом может применяться во вторичных системах энергоснабжения, обеспечивая дифференцированно высокое качество электроснабжения потребителей.

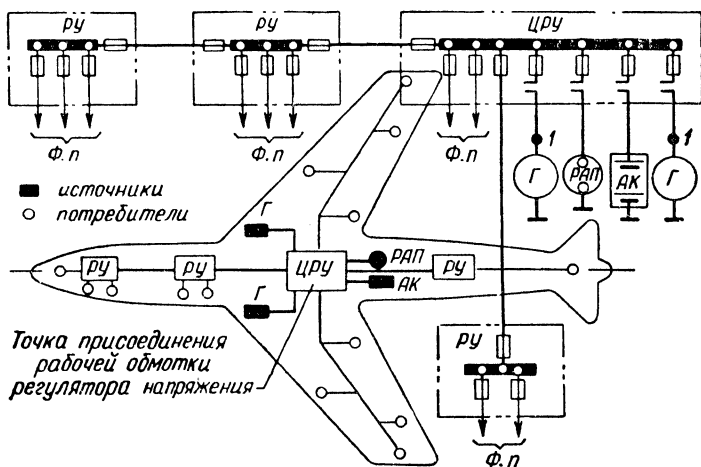


Рис. 1.11. Смешанная система распределения электрической энергии

При смешанной системе распределения электрической энергии вся энергия от источников питания подается к одному центральному распределительному устройству (ЦРУ), затем от шины ЦРУ одна часть энергии непосредственно распределяется между силовыми потребителями, а другая часть подается к групповым распределительным устройствам (РУ), от которых получают питание остальные потребители.

На рис. 1.11 изображена принципиальная схема смешанной системы распределения электрической энергии. В целях снижения веса проводов ЦРУ целесообразно размещать на кратчайшем расстоянии от источников энергии и силовых потребителей, а групповые распределительные устройства в местах сосредоточения потребителей и щитков управления в кабинах экипажа.

Защита фидеров источников энергии и некоторых потребителей сосредоточена в ЦРУ, защита фидеров остальных потребителей — на соответствующих РУ. Управление и контроль источников энергии осуществляется с РУ, находящегося в кабине экипажа.

Преимущества. 1. Смешанная система обладает достоинствами, отмеченными в пп. 1, 2, 3 и 4 для централизованной системы, причем пп. 3 и 4 относятся только к потребителям, получающим питание с шин ЦРУ.

2. Увеличивается живучесть питательной сети в сравнении с централизованной системой распределения, так как при правильном выборе конфигурации сети и ее защиты короткие замыкания в фидере или на шине РУ обесточивают только данное РУ, сохраняя целостность остальной части энергосистемы.

3. Упрощается конструкция распределительных устройств, вследствие рассосредоточения защитной и коммутационной аппаратуры.

4. В связи с приближением ЦРУ к источникам и силовым потребителям, а РУ к потребителям снижается вес электрической сети, упрощается ее монтаж и эксплуатация.

Недостатки. 1. Недостаточная живучесть энергетической системы, так как при коротком замыкании на шине ЦРУ все потребители теряют питание.

2. При неизменном напряжении источников энергии (на шине ЦРУ) напряжение на шинах РУ не остается постоянным, а изменяется в зависимости от числа и мощности потребителей, одновременно подключенных к данному РУ, что снижает качество электроснабжения в сравнении с потребителями, получающими питание с ЦРУ.

3. Напряжение на всех РУ различно. Оно имеет больший диапазон колебания в сравнении с напряжением на ЦРУ, поэтому при разработке принципиальных электросхем потребителей нельзя допускать завязки шин через цепи потребителей.

Смешанная система распределения электрической энергии находит применение на средних летательных аппаратах, имеющих небольшое число и мощность источников энергии, ограниченное количество мощных потребителей, умеренное количество маломощных потребителей и достаточно разветвленную электрическую сеть.

Для повышения надежности применяется секционирование шин РУ и многоканальность питающих проводов с селективной защитой.

При децентрализованной системе распределения электрической энергии (рис. 1.12) источники питания подают энергию соответственно к ближайшим ЦРУ. С ЦРУ энергия подается к близлежащим потребителям и РУ, расположенным в кабинах экипажа и запитывающим в основном несиловые потребители, и к РУ, устанавливаемым в местах группового расположения потребителей.

Для увеличения живучести энергосистемы все ЦРУ соединяются между собой, в результате чего питательная сеть оказывается многократно замкнутой.

Преимущества. 1. Децентрализованная система распределения обладает всеми достоинствами, отмеченными для смешанной системы.

2. Наличие нескольких ЦРУ значительно повышает надежность энергоснабжения при обрыве питающих линий и некоторых видах коротких замыканий на шинах.

3. Возрастает надежность питания шин РУ, так как возможны их секционирование и запитка с различных ЦРУ.

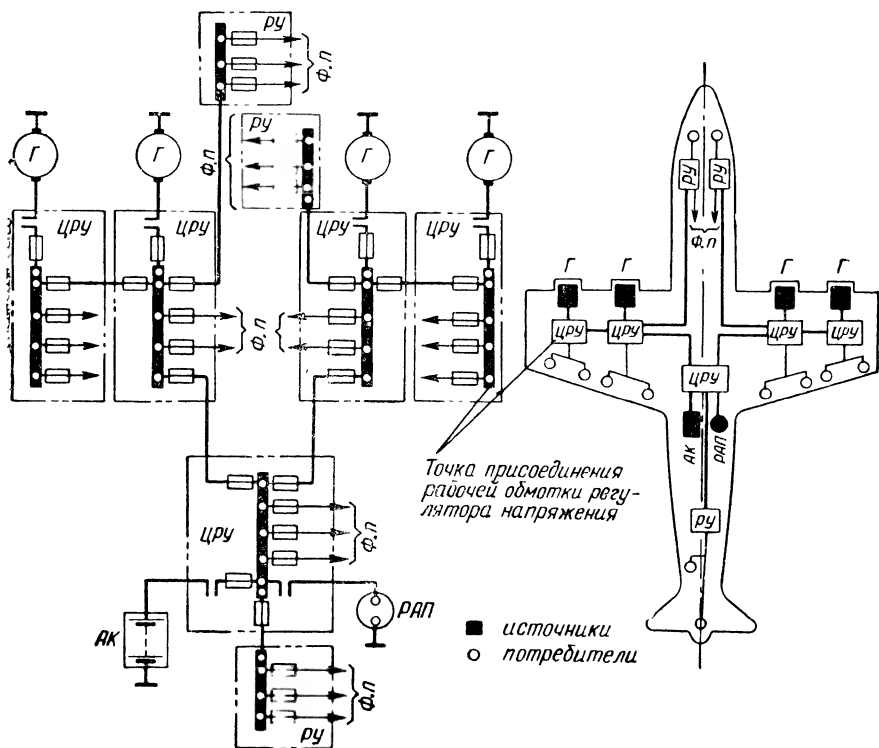


Рис. 1.12. Децентрализованная система распределения электрической энергии

4. Возможно применение кольцевой сети с селективной защитой, повышающей надежность электроснабжения.

Недостатки. Децентрализованная система распределения обладает недостатками, отмеченными в пп. 2 и 3 для смешанной системы.

Децентрализованная система распределения электрической энергии получила широкое распространение на всех видах и типах летательных аппаратов и особенно средних и тяжелых.

Раздельная система распределения электрической энергии (автономная) характеризуется тем, что каждый источник обслуживает лишь свою группу потребителей.

Раздельная система применяется в тех случаях, когда невозможна параллельная работа источников электрической энергии

из-за неодинаковых их электрических параметров, например, различных допусков по напряжению или частоте при одних и тех же номинальных значениях.

Раздельная система распределения электрической энергии может включать элементы централизованной и смешанной систем.

Отсутствие параллельной работы источников энергии не позволяет рационально использовать располагаемую мощность, затрудняет запуск мощных потребителей и увеличивает колебания напряжения в сети при их включении.

При выходе из строя источника энергии целая группа потребителей теряет питание.

Раздельная система распределения находит применение как в первичных, так и во вторичных системах энергоснабжения. Она совершенно неизбежна в энергосистемах переменного тока нестабилизированной частоты и возможна как эксплуатационный вариант в системах переменного тока стабилизированной частоты при выходе генераторов из синхронизма, а также для автономной работы генераторов при взлете и посадке с целью повышения надежности питания дублированных потребителей. Кроме того, раздельная система распределения находит широкое применение во вторичных энергосистемах, источниками энергии в которых являются электромашинные или статические преобразователи постоянного тока в переменный стабилизированной частоты или переменного тока в постоянный.

§ 6. КОНФИГУРАЦИЯ ПИТАТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ

Конфигурация (геометрия) питательных сетей является основным фактором в обеспечении надежности и бесперебойности энергоснабжения потребителей, определяет качество электроснабжения, селективность срабатывания защиты, живучесть и вес сети. Конфигурация кладется в основу наименования питательной сети.

По конфигурации питательные сети делятся на три типа: *разомкнутые, замкнутые и комбинированные*. Каждый тип питательной сети может иметь различные способы передачи и распределения электрической энергии, канальность и защиту линий питания.

Рассмотрим достоинства и недостатки основных типов конфигураций применительно к системам энергоснабжения постоянным током, так как все основные положения полностью распространяются и на энергетические системы переменного тока.

Разомкнутые питательные сети

В разомкнутых питательных сетях электрическая энергия к распределительным шинам поступает только в одном направлении. Их можно представить двумя основными видами: радиальными и магистральными.

Радиальные питательные сети. На рис. 1.13, *a* показана разомкнутая радиальная одноканальная питательная сеть.

Преимущества. 1. Легко поддается расчету и подбору аппаратов защиты, селективно срабатывающих при коротких замыканиях и перегрузках.

2. Проста в монтаже и эксплуатации.

3. Имеет минимальный вес проводов, так как РУ можно размещать в местах сосредоточения потребителей.

Недостатки. 1. Напряжение на шине вторичного РУ изменяется в зависимости от числа и мощности потребителей, одновременно подключенных к данному РУ.

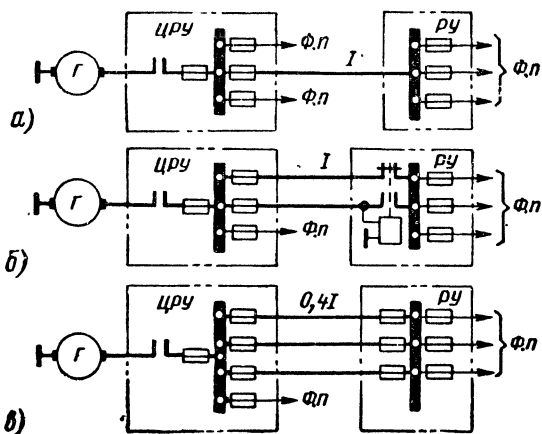


Рис. 1.13. Разомкнутые радиальные питательные сети

2. При коротком замыкании на шине ЦРУ вся энергосистема выходит из строя.

3. При обрыве или коротком замыкании в линии питания РУ потребители, подключенные к этой шине, лишаются электрической энергии.

Разомкнутая радиальная одноканальная питательная сеть получила широкое распространение, однако вследствие малой надежности и живучести не рекомендуется для перспективных летательных аппаратов.

На рис. 1.13, б представлена разомкнутая радиальная одноканальная питательная сеть с автоматическим резервированием линии питания.

Преимущества. 1. Сеть обладает достоинствами, отмеченными для разомкнутой радиальной одноканальной питательной сети.

2. При обрыве или металлическом коротком замыкании основной линии питания автоматически включается резервная, обеспечивая бесперебойное питание потребителей.

Недостатки. 1. Сеть обладает недостатками, отмеченными в пп. 1, 2 и 3 (в части к. з. на шине) для разомкнутой радиальной одноканальной питательной сети.

2. При перемежающихся коротких замыканиях в основной линии контактор не переключается, так как напряжение в сети при этом остается довольно высоким (19—23 в).

3. При коротком замыкании на распределительной шине РУ контактор входит в режим «звонка».

4. Вес проводов увеличивается в два раза в сравнении с одноканальной сетью.

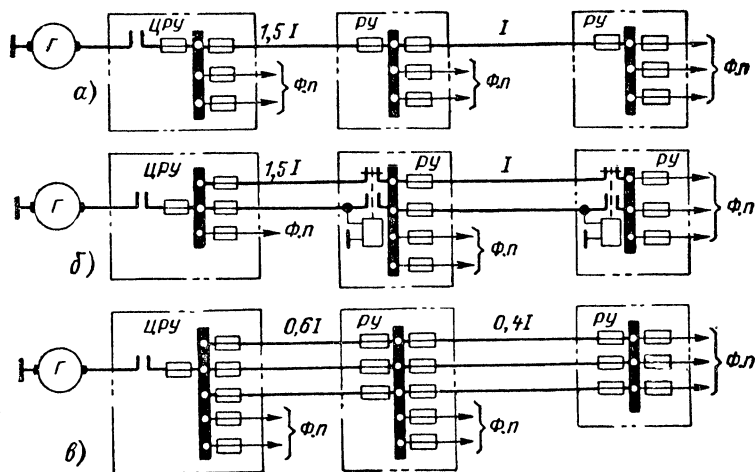


Рис. 1. 14. Разомкнутые магистральные питательные сети

На рис. 1. 13, в представлена разомкнутая радиальная многоканальная питательная сеть.

Преимущества. 1. Сеть обладает достоинствами, отмеченными для разомкнутой радиальной одноканальной питательной сети.

2. Применение независимых линий питания с числом не менее трех и двусторонней защитой значительно повышает надежность энергоснабжения РУ при коротких замыканиях и обрывах проводов без увеличения веса проводов в сравнении с одноканальной сетью.

Сеть обладает недостатком, отмеченным в п. 1 для разомкнутой радиальной одноканальной питательной сети.

Магистральные питательные сети. В разомкнутой магистральной питательной сети распределительные шины соединены последовательно, а электрическая энергия подводится к ним только с одной стороны. Типовые схемы представлены на рис. 1. 14.

Сети обладают достоинствами, отмеченными для соответствующих схем разомкнутой радиальной питательной сети.

Недостатки. 1. Сети имеют те же недостатки, что и подобные радиальные.

2. Напряжение на шинах вторичных и третичных распределительных устройств (РУ) изменяется в зависимости от числа и мощности потребителей, одновременно подключенных к этим распределительным устройствам, причем колебание напряжения возрастает с каждой последовательно включенной шиной.

3. При обрыве или коротком замыкании промежуточных линий обесточиваются ближайшие и все последующие распределительные шины.

4. При большом числе смежных участков трудно обеспечить селективность срабатывания защиты с помощью плавких предохранителей или тепловых автоматов защиты, так как для селективности необходимо ступенчатое увеличение выдержки времени аппаратов защиты от конца линии к ее началу при протекании токов короткого замыкания. Для надежности действия защиты необходимо, чтобы номинальные токи аппаратов защиты смежных участков отличались не менее чем в полтора раза. При большом числе смежных участков защита оказывается загробленной и ее надежное действие на головных участках не обеспечивается. Это положение усугубляется в энергосистемах большой мощности, в силу своеобразия внешних характеристик генераторов, где ток к. з. в линии при приближении точки к. з. к началу линии уменьшается.

Замкнутые питательные сети

Замкнутыми питательными сетями называются такие, в которых шины распределительных устройств получают питание от нескольких независимых источников энергии с нескольких сторон, по меньшей мере с двух.

Под независимыми источниками энергии понимаются такие, у которых нарушение режима работы или повреждение одного из них (например, короткое замыкание на шинах одного ЦРУ) не влечет за собой выхода из работы других.

Замкнутые питательные сети можно разделить на четыре основных вида: *радиальные, магистральные, сетчатые и кольцевые.*

Достоинства. 1. При симметричном распределении нагрузок по шинам в нормальном режиме эксплуатации сети отсутствует уравнительный ток в среднем звене. Симметричные шины РУ при этом будут находиться под одинаковым напряжением и соответствующие участки сети между ЦРУ и РУ могут рассчитываться на полную допустимую потерю напряжения.

2. Сети обладают достоинствами, отмеченными в соответствующих разделах для разомкнутых радиальных питательных сетей.

3. Сети, в сравнении с разомкнутыми, имеют повышенную надежность и живучесть при обрывах и коротких замыканиях в линиях питания и на шинах РУ.

4. При коротком замыкании на шине ЦРУ только часть энергосистемы выходит из строя, прекращая энергоснабжение соответствующих потребителей.

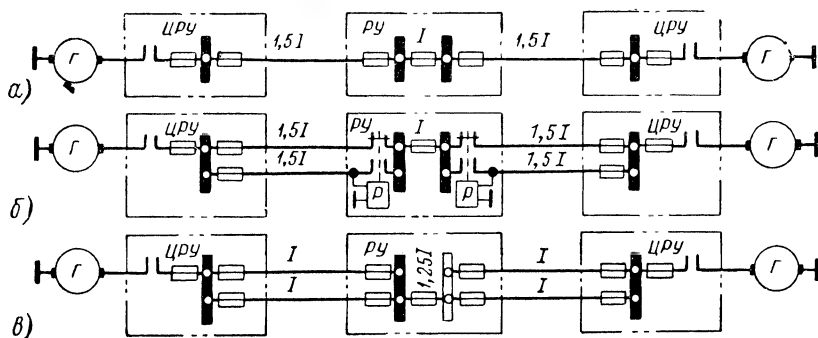


Рис. 1.15. Замкнутые радиальные питательные сети

Радиальные питательные сети (рис. 1.15) обладают достоинствами, отмеченными в пп. 1—4. Особый интерес представляет замкнутая радиальная двухканальная питательная сеть, показанная на рис. 1.15, в *.

Сеть сохраняет нормальное энергоснабжение шин РУ при коротком замыкании в любой линии питания, что обеспечивается селективным срабатыванием аппаратов защиты.

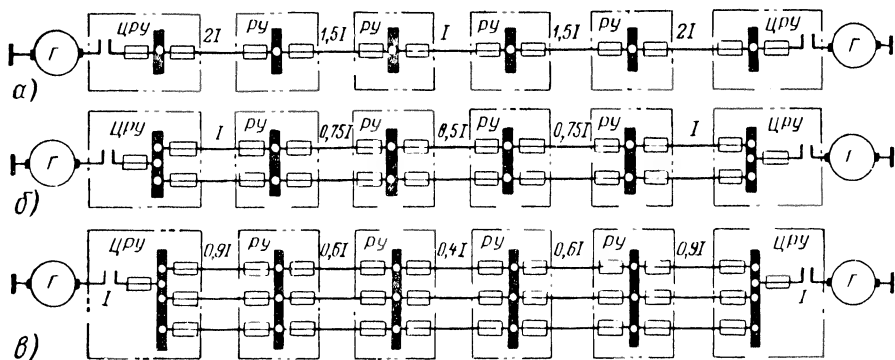
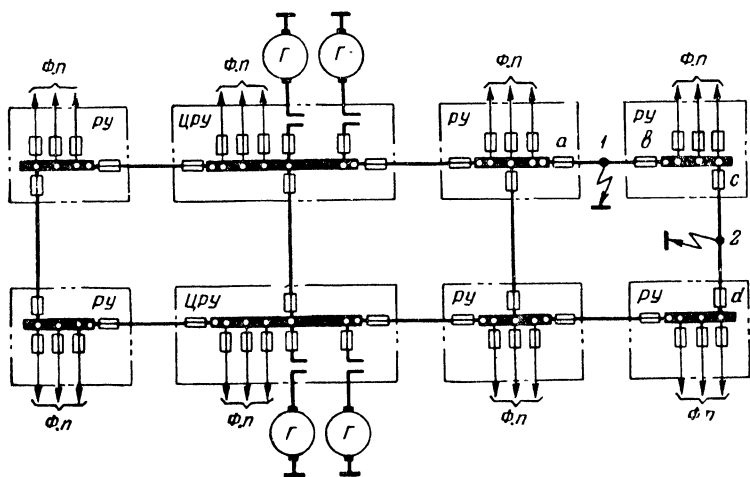


Рис. 1.16. Замкнутые магистральные питательные сети

Магистральные питательные сети (рис. 1.16) обладают достоинствами, отмеченными в пп. 1—4, однако в таких сетях трудно обеспечить селективное срабатывание защиты при коротких замыканиях линий или распределительных шин, а последова-

* Предложена автором.

Сетчатые питательные сети представляют собой многократно замкнутые сети с наличием нескольких параллельно подключенных источников электрической энергии (рис. 1.17).



1. 17. Сетчатая питательная сеть

Однако в таких сложных конфигурациях питательных сетей практически невозможно правильно подобрать защиту.

Если же произошло короткое замыкание на участке cd , то, очевидно, для отключения этого участка при условии, чтобы вся остальная сеть продолжала нормально работать, надо иметь минимальное время срабатывания аппаратов c и d , а это противоречит

выбору аппаратов защиты из условий предыдущего аварийного режима на участке *ав*.

В силу изложенного защита таких питательных сетей неэффективна и приводит только к снижению надежности.

Такие сети применяются без аппаратов защиты, но они представляют серьезную опасность в отношении пожара при коротких замыканиях.

Кольцевые питательные сети. В кольцевых питательных сетях энергия к распределительным шинам подводится минимум с двух сторон от независимых источников энергии, и каждая линия сети имеет аппараты защиты с двух сторон.

Типовые схемы кольцевых питательных сетей с селективной защитой *, представленные на рис. 1.18, обладают всеми достоинствами, отмеченными для сетей других конфигураций и имеют ряд преимуществ перед ними.

На рис. 1.18, *а* представлена кольцевая трехканальная питательная сеть, в которой энергия к первичным распределительным шинам подводится по трем каналам, а ко вторичным — по двум.

Достоинства. 1. При выходе из строя какого-либо источника энергии или срыве любого провода все потребители получают нормальное питание.

2. Шины РУ обладают повышенной надежностью электроснабжения за счет секционирования и питания от разных ЦРУ.

3. Сеть позволяет размещать распределительные устройства вблизи сосредоточения потребителей.

4. Первичные распределительные шины имеют стабильное напряжение, зависящее только от точности работы регуляторов напряжения.

5. При симметричном распределении нагрузок по шинам отсутствует уравнильный ток между ЦРУ и в среднем звене РУ.

6. При к. з. в любом проводе срабатывает двусторонняя защита, изолируя провод от сети.

7. При к. з. на шине ЦРУ обесточивается только половина распределительных шин, а при к. з. на шине РУ — только шина с к. з.

Недостатки. 1. Большие трудности выбора защиты, обеспечивающей селективное и быстрое срабатывание при к. з.

2. Недостаточное быстродействие защиты при к. з. на шинах ЦРУ.

На рис. 1.18, *б* представлена кольцевая пятиканальная питательная сеть, имеющая главное и вторичное энергетические кольца. Количество последних определяется числом сосредоточенных групп потребителей. Энергия к первичным распределительным шинам подводится по пяти каналам, а ко вторичным — по трем.

* Предложены автором в 1950 г.

Основным условием уверенного селективного срабатывания защиты при к. з. в линиях питания распределительных шин является наличие не менее трех каналов с двусторонней защитой каждого. Увеличение числа каналов улучшает селективность и повышает быстродействие защиты.

Селективность срабатывания защиты при к.з. в проводах или распределительных шинах вторичного энергетического кольца

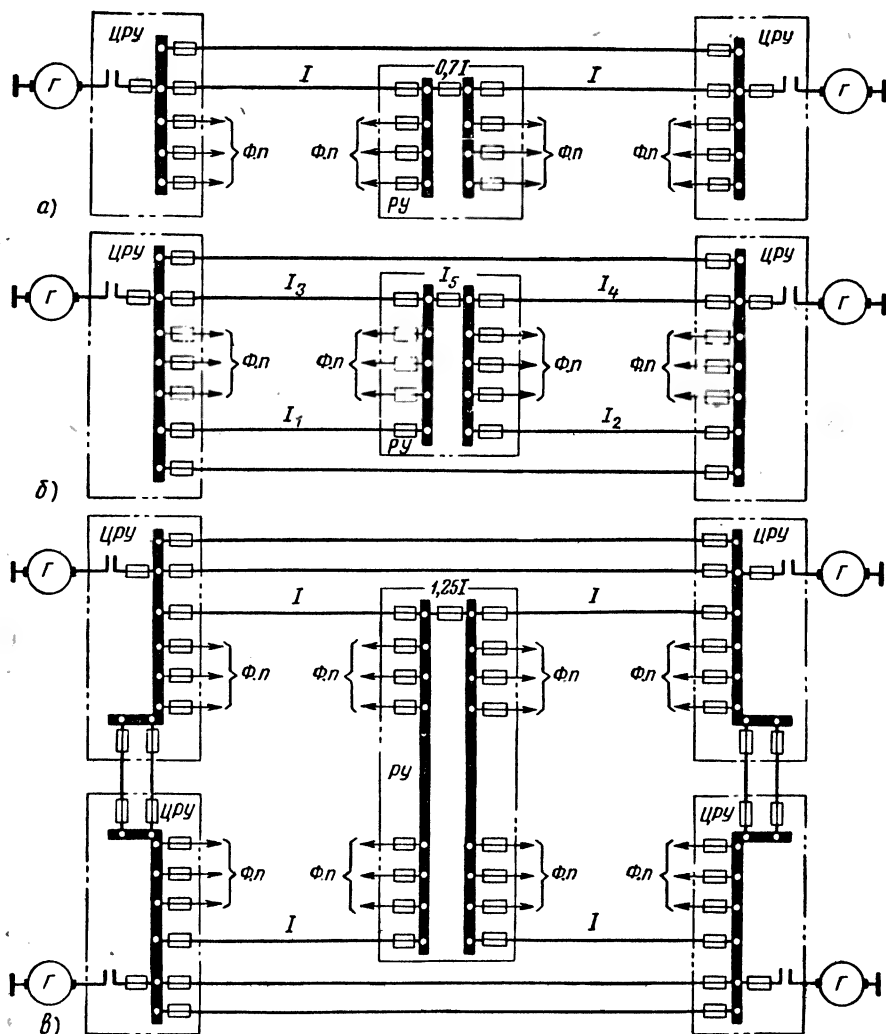


Рис. 1. 18. Кольцевые питательные сети:

а—трехканальная; б—пятиканальная; в—шестиканальная

обеспечивается соответствующим подбором номинальных значений защиты с учетом следующим соотношений:

$$I_1 = I_2 = I_3 = I_4 = I < I_5,$$

$$I_1 + I_3 = I_2 + I_4 = 2I > I_5,$$

где $I_1 \div I_4$ — номинальные токи защиты. Практически I_5 выбирается равной $1,2 \div 1,5I$.

Достоинства. 1. Сеть обладает достоинствами, отмеченными в пп. 1—5 для кольцевой трехканальной питательной сети.

2. Легко поддается расчету и подбору селективно срабатывающей защиты.

3. При коротком замыкании в любой линии питательной сети срабатывает двусторонняя защита вследствие повышения тока в ней в сравнении с другими.

4. При к. з. любой шины РУ или ЦРУ срабатывает соответствующая защита и шина изолируется от сети. При к. з. на шинах РУ первой срабатывает защита I_5 и далее остальная, подходящая к ней.

5. В сравнении со схемой *а* (за счет увеличения числа каналов и снижения номинальной величины защиты) повышается селективность и быстродействие ее срабатывания при коротких замыканиях.

Недостатком сети является относительно малое быстродействие при к. з. на шинах ЦРУ, однако при увеличении числа источников быстродействие возрастает.

На рис. 1.18, *в* представлена кольцевая шестиканальная питательная сеть, имеющая главное (двухканальное) и вторичное энергетические кольца.

Энергия к первичным распределительным шинам подводится по шести каналам, а ко вторичным — по трем.

Сеть сохраняет все достоинства, отмеченные для кольцевой пятиканальной питательной сети, кроме того, имеет повышенное быстродействие и лучшую селективность срабатывания защиты при к. з. в линиях главного кольца и на шинах ЦРУ. Это достигается в первом случае за счет увеличения числа каналов главного кольца и снижения номинальной величины защиты, а во втором — вследствие трехкратного увеличения тока в линиях, подходящих к поврежденной шине в сравнении с другими.

Таким образом, многоканальные кольцевые питательные сети с селективной защитой практически сохраняют живучесть до последнего источника энергии при неоднократных замыканиях и обрывах линий питания. Они (особенно схема *в*) обладают абсолютной надежностью и живучестью в сравнении с другими конфигурациями питательных сетей и обеспечивают бесперебойное энергоснабжение потребителей. Эти сети должны являться основой при разработке всевозможных систем энергоснабжения.

Комбинированные питательные сети

Комбинированные питательные сети представляют собой всевозможные комбинации различных видов замкнутых и разомкнутых питательных сетей.

Распределительные устройства, включающие элементы замкнутых питательных сетей, получают питание от нескольких независи-

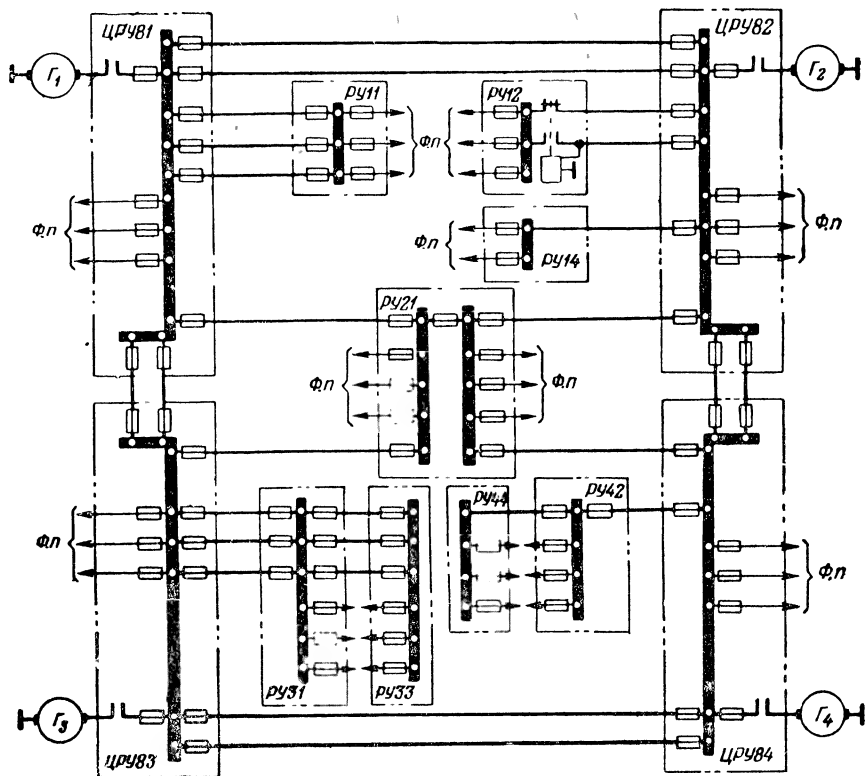


Рис. 1. 19. Комбинированная питательная сеть

мых источников энергии с нескольких сторон, а распределительные устройства, включающие элементы разомкнутых питательных сетей, получают питание с одного направления. Число различных комбинаций таких питательных сетей весьма велико и рассмотреть их не представляется возможным. Остановимся на одной из типовых схем комбинированной питательной сети, представленной на рис. 1. 19, из которой видны основные достоинства и недостатки таких питательных сетей.

В этой схеме шины первичных распределительных устройств (ЦРУ) соединены между собой двухканальными питательными

линиями с двусторонней селективной защитой и образуют первичное (главное) двухканальное энергетическое кольцо, обладающее высокой надежностью энергоснабжения при неоднократных коротких замыканиях в линиях питания или на шинах распределительных устройств, а также при выходе из строя отдельных источников энергии.

Шины вторичного распределительного устройства РУ21 запитываются по схеме вторичного трехканального кольца и обладают, как отмечалось выше, высокой надежностью.

Шина вторичного распределительного устройства РУ14 запитывается по схеме разомкнутой одноканальной радиальной сети.

Шина РУ12 запитывается по схеме разомкнутой радиальной одноканальной питательной сети с резервированием линии питания.

Шина РУ11 запитывается по схеме разомкнутой радиальной трехканальной питательной сети.

Шины вторичного распределительного устройства РУ42 и третичного РУ44 запитываются по схеме разомкнутой магистральной одноканальной питательной сети.

Шины РУ31 и РУ33 запитываются по схеме разомкнутой магистральной трехканальной питательной сети.

Как видно из рассмотрения типовой схемы комбинированной питательной сети, ее отдельные узлы обладают свойствами соответствующих питательных сетей, подробно рассмотренных ранее.

Характер всевозможных комбинаций, образующих различные виды, определяется назначением летательного аппарата и ролью того или иного распределительного устройства в обеспечении надежности энергоснабжения потребителей и вытекающей отсюда безопасности полета.

Элементы замкнутой кольцевой питательной сети с селективной защитой имеют доминирующее значение и определяют основные достоинства комбинированной питательной сети.

Элементы разомкнутых питательных сетей для второстепенных потребителей следует вводить ограниченно и только при явном преимуществе в весовом отношении и селективности срабатывания защиты.

Глава II

ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

§ 1. НАЗНАЧЕНИЕ, ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ ЗАЩИТЫ СЕТЕЙ

При эксплуатации летательных аппаратов возможны повреждения сети, источников энергии, потребителей и аппаратуры, вызывающие, короче замыкания и перегрузки элементов оборудования.

На современных л. а. токи короткого замыкания достигают нескольких тысяч ампер и при длительном существовании могут вызывать воспламенение изоляции, сваривание токонесущих элементов с корпусом л. а., разрушение отдельных узлов конструкции и оборудования. Это может привести к выходу из строя отдельных видов электрооборудования.

Перегрузка отдельных элементов электрооборудования приводит к тем же последствиям, что и короткие замыкания.

Защита электрической сети л. а. предназначена для предотвращения тяжелых последствий, к которым могут привести короткие замыкания и перегрузки, поэтому она должна обладать надежностью, селективностью, инерционностью, быстродействием, простотой, минимальными габаритами и весом.

Надежность срабатывания защиты зависит от ее чувствительности, которая определяется отношением тока при металлическом к. з. в защищаемой зоне к току срабатывания защиты. Чем больше чувствительность защиты, тем надежнее ее срабатывание в аварийных режимах. Защита не должна приводить к ложному отключению защищаемого участка, т. е. реагировать на причины, не вызывающие аварийное состояние сети, и вместе с тем должна надежно срабатывать в аварийных режимах. Неисправности в самой аппаратуре защиты не должны приводить к ложному отключению исправной сети.

Селективность (избирательность) действия защиты обеспечивает отключение только поврежденного участка, сохраняя живучесть остальной электросети. Для обеспечения селективности действия очередность срабатывания аппаратов защиты, последовательно включенных в сеть, должна быть такой, чтобы сначала срабатывал аппарат, расположенный в непосредственной близости от места короткого замыкания, а потом (в случае его отказа) срабатывали последующие элементы защиты, обладающие выдержкой времени по восходящей линии от потребителя к источнику.

Указанная очередность срабатывания аппаратов защиты сети достигается соответствующим подбором их ампер-секундных характеристик.

Инерционность защиты исключает возможность ее срабатывания при действии кратковременных пусковых токов, которые могут значительно превосходить номинальные токи в защищаемом участке сети.

Быстродействие защиты уменьшает влияние коротких замыканий на работу потребителей, сохраняет качество электрической энергии, уменьшает размеры разрушений, возникающих при коротких замыканиях, сохраняет устойчивость работы и живучесть системы энергоснабжения.

Для уменьшения влияния поврежденных участков на исправные защита должна реагировать мгновенно, особенно при к. з. в фидере генераторов и в главных участках питательной сети.

Простота, минимальные габариты и вес аппаратуры защиты позволяют разместить ее в наиболее целесообразных местах, повысить надежность ее работы, а также упростить эксплуатацию.

Задача одновременного удовлетворения всех указанных свойств является самой трудной при проектировании сетей энергетических систем.

Защита питательных сетей, генераторов и их фидеров от коротких замыканий по принципу действия разбивается на три основных группы:

1. Токовая защита, реагирующая на величину тока в защищаемой цепи, приходит в действие при повышении тока в защищаемой цепи сверх установленной величины и срабатывает без выдержки (токовая отсечка) или с выдержкой времени (максимальная токовая защита).

2. Дифференциально-токовая защита, основанная на принципе сравнения токов в начале и конце защищаемого участка сети (продольная защита) или в двух параллельных линиях с одинаковыми параметрами (поперечная защита). Защита этой группы срабатывает без выдержки времени, практически мгновенно, как только разность сравниваемых токов превзойдет заранее установленную величину.

Дифференциально-токовая защита питательных сетей постоянного тока, несмотря на быстродействие, не получила практического применения из-за ряда недостатков: усложнения конструкции, увеличения веса, появления дополнительных проводов и контактов, наличия мертвых зон, необходимости постороннего источника энергии (в схемах продольной защиты) и дополнительной максимальной-токовой защиты [10].

3. Защита минимального напряжения, действующая с выдержкой времени при снижении напряжения на зажимах генератора до некоторого заданного значения.

§ 2. МАКСИМАЛЬНО-ТОКОВАЯ ЗАЩИТА СЕТЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

К максимально-токовым аппаратам защиты относятся предохранители и биметаллические автоматы всех типов. В настоящее время находят применение безынерционные предохранители типа СП и ПВ, тугоплавкие предохранители типа ТП, инерционные предохранители типа ИП, биметаллические автоматы типа АЗС и АЗР.

Важнейшим параметром максимально-токовой защиты является величина критического тока, который данный тип защиты выдерживает бесконечно долгое время при определенных внешних условиях. Так, например, при нормальных атмосферных условиях

и окружающей температуре $+20^{\circ}\text{C}$ плавкие предохранители имеют следующие приближенные значения критических токов:

$$\text{СП} — I_{\text{кр}} = (1,2—1,4) I_{\text{ном}}$$

$$\text{ПВ} — I_{\text{кр}} = (1,2—1,25) I_{\text{ном}}$$

$$\text{ТП} — I_{\text{кр}} = (1,4—1,57) I_{\text{ном}}$$

$$\text{ИП} — I_{\text{кр}} = (1,25—1,75) I_{\text{ном}}$$

Наиболее точно эффективность действия аппаратов максимально-токовой защиты определяют их ампер-секундные характеристики, представляющие собой зависимость времени срабатывания аппарата от величины протекающего по нему тока.

Ампер-секундные характеристики позволяют определить необходимое быстроедействие при отключении токов короткого замыкания, требуемую чувствительность к токам перегрузки и необходимую инерционность при пусковых токах и кратковременных изменениях нагрузки.

Плавкие предохранители типа ПВ и СП имеют зависимые ампер-секундные характеристики, т. е. время их перегорания зависит от величины протекающего тока. Наибольшее различие ампер-секундных характеристик различных плавких предохранителей наблюдается в области малых токов. Так, при одном и том же токе время срабатывания всегда больше у предохранителя с большим значением номинального тока. Это свойство используется для обеспечения селективной работы при небольших токах короткого замыкания или перегрузках. При больших токах ампер-секундные характеристики плавких предохранителей сливаются и селективность их срабатывания не обеспечивается.

Предохранители типа ПВ малоинерционны, типа СП обладают большей инерционностью. Однако оба типа не обеспечивают защиту потребителей с большими пусковыми токами.

Плавкие предохранители просты, малогабаритны и обладают достаточным быстрымдействием. Основной их недостаток — отсутствие селективности действия при больших токах и визуального контроля за состоянием.

Для обеспечения селективного срабатывания плавких предохранителей их характеристики должны быть идентичными, а переходные сопротивления между вставкой и державкой минимальными и стабильными. Предохранители должны иметь световую или механическую сигнализацию, указывающую их перегорание.

Тугоплавкие предохранители типа ТП малоинерционны, применяются для защиты силовых цепей с малыми пусковыми токами.

Инерционные предохранители типа ИП обладают значительной выдержкой времени, которая достигается их особой конструкцией.

На рис. 2.1 приведена ампер-секундная характеристика инерционного предохранителя. Участок 1 соответствует относительно небольшим токам, характеризует инерционную часть предохранителя и определяет в основном постоянную времени нагрева мас-

сивной медной пластинки. Участок 2 соответствует большим токам, при которых перегорает латунная плавкая вставка. В силу этого инерционные предохранители устанавливаются в цепях потребителей с большими пусковыми токами.

К недостаткам плавких предохранителей относятся: зависимость времени срабатывания от окружающей температуры и состояния контактов, однократность действия, исключающая возможность проверки их характеристик в процессе эксплуатации, изменение ампер-секундных характеристик вследствие старения материала и трудность визуальной оценки срабатывания предохранителей.

Биметаллические автоматы защиты по кинематической схеме делятся на два типа: АЗС и АЗР. Принцип действия автоматов основан на прогибе биметаллических элементов при нагревании. Биметаллический элемент состоит из двух сваренных друг с другом металлических пластин, имеющих различные температурные коэффициенты линейного расширения.

Автоматы защиты типа АЗС не имеют свободного расцепления органов управления и контактной системы, являются автоматами с ручным включением и автоматическим и ручным выключением и позволяют принудительно удерживать защищаемую цепь во включенном состоянии независимо от величины тока, протекающего через автомат. Принудительное удержание иногда используется для обеспечения срабатывания ответственных потребителей: вооружения; связи, шасси и т. д. АЗС устанавливаются в цепях, которые находятся вне пожароопасных отсеков и могут использоваться как выключатели.

Автоматы защиты типа АЗР со свободным расцеплением органов управления и контактной системы также являются автоматами с ручным включением и автоматическим и ручным выключением. В отличие от автомата АЗС после срабатывания автомат АЗР нельзя включить вручную и замкнуть цепь до тех пор, пока не остынет биметаллическая пластина. АЗР в сравнении с АЗС имеют лучшие ампер-секундные характеристики и большую разрывную мощность. В АЗР цепь разрывается в двух точках, что обеспечивает лучшие условия гашения дуги.

На рис. 2.2 изображены ампер-секундные характеристики холодного (кривая 1) и предварительно прогретого током (кривая 2) автомата защиты. Кривые 1 и 2 имеют одни и те же асимптоты. Время срабатывания автоматов защиты так же, как и предохранителей, зависит от окружающей температуры.

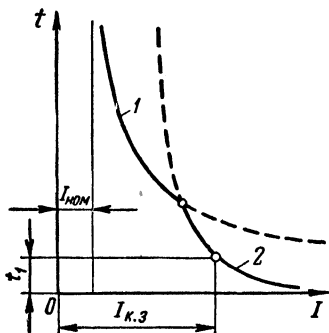


Рис. 2.1. Ампер-секундная характеристика инерционного предохранителя

$I_{ном}$ — ток потребителя; $I_{к.з.}$ — ток к. з.; t_1 — время срабатывания защиты.

Основные преимущества автоматов по сравнению с предохранителями:

- наличие регулировочных элементов, позволяющих получить необходимую крутизну ампер-секундной характеристики;
- возможность снять ампер-секундную характеристику перед установкой автомата на л. а. и в процессе эксплуатации;
- простота включения и выключения цепи;
- возможность визуального наблюдения за состоянием автомата в процессе эксплуатации;
- значительно большая тепловая инерция (исключая предохранители типа ИП).

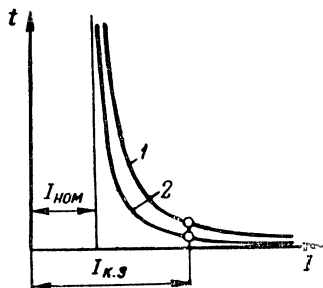


Рис. 2.2. Ампер-секундные характеристики автомата защиты: холодного (1) и предварительно прогретого (2)

В идеальном случае ампер-секундная характеристика аппарата защиты должна совпадать с тепловой характеристикой защищаемого объекта. При таком расположении характеристик аппарат защиты выбирается по номинальному току защищаемого объекта.

Однако практически характеристики совпадают не во всем диапазоне, вследствие чего защиту цепей потребителей от коротких замыканий и перегрузок выбирают по номинальному току потребителей с учетом характера их работы.

$$I_{\text{защ}} = K \cdot I_{\text{ном}},$$

где $I_{\text{защ}}$ — номинальный ток защиты;

$K \geq 1$ — коэффициент запаса;

$I_{\text{ном}}$ — номинальный ток потребителя.

Если ток потребителя при всех режимах его работы не превышает номинального, то защита выбирается на ближайший больший ток в сравнении с номинальным. В этом случае коэффициент запаса приближается к единице и для защиты могут быть использованы плавкие, тугоплавкие и инерционные предохранители или биметаллические автоматы.

Если потребители в некоторых режимах работы потребляют ток, превосходящий номинальный, то защита выбирается с учетом этих режимов.

Для электродвигателей постоянного тока пусковые токи достигают 3—8-кратного значения от номинального. Однако, учитывая кратковременный характер пусковых токов, безынерционную защиту можно выбирать из условия $I_{\text{защ}} \geq 0,7 I_{\text{пуск}}$. Безынерционные предохранители, естественно, не защищают электродвигатели от перегрузок.

Наиболее рациональной защитой для таких потребителей являются инерционные предохранители и биметаллические автоматы. При этом защиту следует выбирать так, чтобы ее ампер-секундные характеристики были ниже ампер-секундных характеристик потребителя, но приближались к ним.

Максимально-токовые аппараты защищают в основном сеть и только частично предохраняют потребители от перегрузок. Поскольку для потребителей важна не величина тока, а нагрев изоляции, то их защищать целесообразнее всего с помощью аппаратов, встроенных в наиболее нагретую часть их.

При коротких замыканиях в отдельных участках питающей сети защита должна отключать поврежденный участок, сохраняя живучесть энергетической системы.

Защита питающей сети не должна реагировать на короткие замыкания в распределительной сети. Это достигается применением селективнодействующей защиты, номинальный ток которой для последовательно включенных аппаратов увеличивают по восходящей линии — от потребителей к источникам энергии. Однако применение селективно действующей защиты приводит к некоторому затягиванию процесса отключения к.з. в головном участке питающей сети.

Практически аппаратура защиты питающей сети подбирается по суммарному току одновременно работающих потребителей и, следовательно, ток ее срабатывания значительно выше тока срабатывания защиты любого из потребителей, что автоматически обеспечивает селективность защиты сети.

При больших токах короткого замыкания время срабатывания защиты становится очень малым и все ампер-секундные характеристики сходятся к оси абсцисс. Вследствие этого возможны ложные срабатывания защиты, вероятность которых возрастает за счет нестабильности характеристик аппаратов защиты, особенно плавких предохранителей. Кроме того, защита питающей сети нечетко реагирует на перемежающиеся к.з.

Выбор рациональной схемы, геометрии и параметров максимально-токовой защиты питающей сети почти во всех случаях дает возможность получить необходимую селективность, быстрдействие и минимальное время отключения участка с к.з. от исправной части питающей сети.

Максимально-токовая защита благодаря простоте, достаточному быстрдействию и надежности является в настоящее время основным видом защиты сетей на летательных аппаратах.

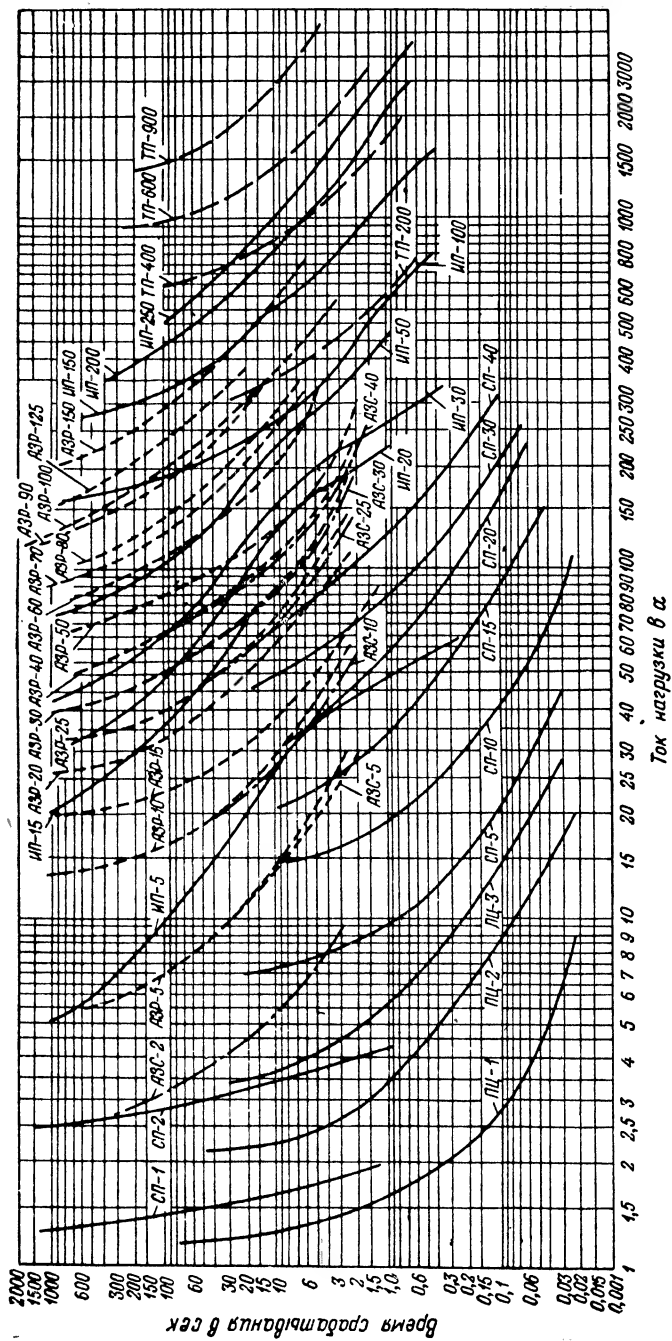


Рис. 2.3. График ампер-секундных характеристик максимального тока защиты сети

На рис. 2.3 приведены ампер-секундные характеристики различных аппаратов максимально-токовой защиты сети, по которым определяется ее номинальный ток и быстродействие в зависимости от величины протекающего тока.

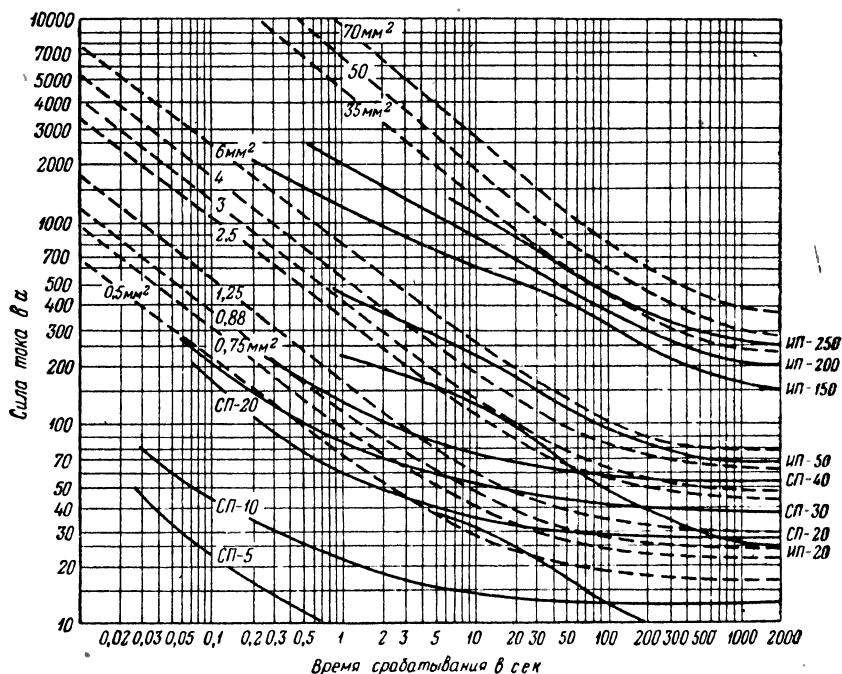


Рис. 2.4. График согласования ампер-секундных характеристик проводов и максимально-токовой защиты

На рис. 2.4 показан график согласования ампер-секундных характеристик проводов и максимально-токовой защиты, позволяющий определить сечения проводов в зависимости от выбранного аппарата защиты. Этой же цели служит график, приведенный на рис. 2.5.

§ 3. МАКСИМАЛЬНО-ТОКОВАЯ ЗАЩИТА СЕТЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

В системе электроснабжения л. а. с переменным током для защиты однофазных и трехфазных питательных и распределительных сетей могут использоваться плавкие предохранители и биметаллические автоматы, применяемые для защиты сетей постоянного тока. Однако одноцепевая защита в трехфазных системах может применяться только для многоканальных участков питательных линий от ЦРУ до РУ и трехфазных потребителей, у которых при срабатывании защиты в одной фазе не возникает аварийная ситуация.

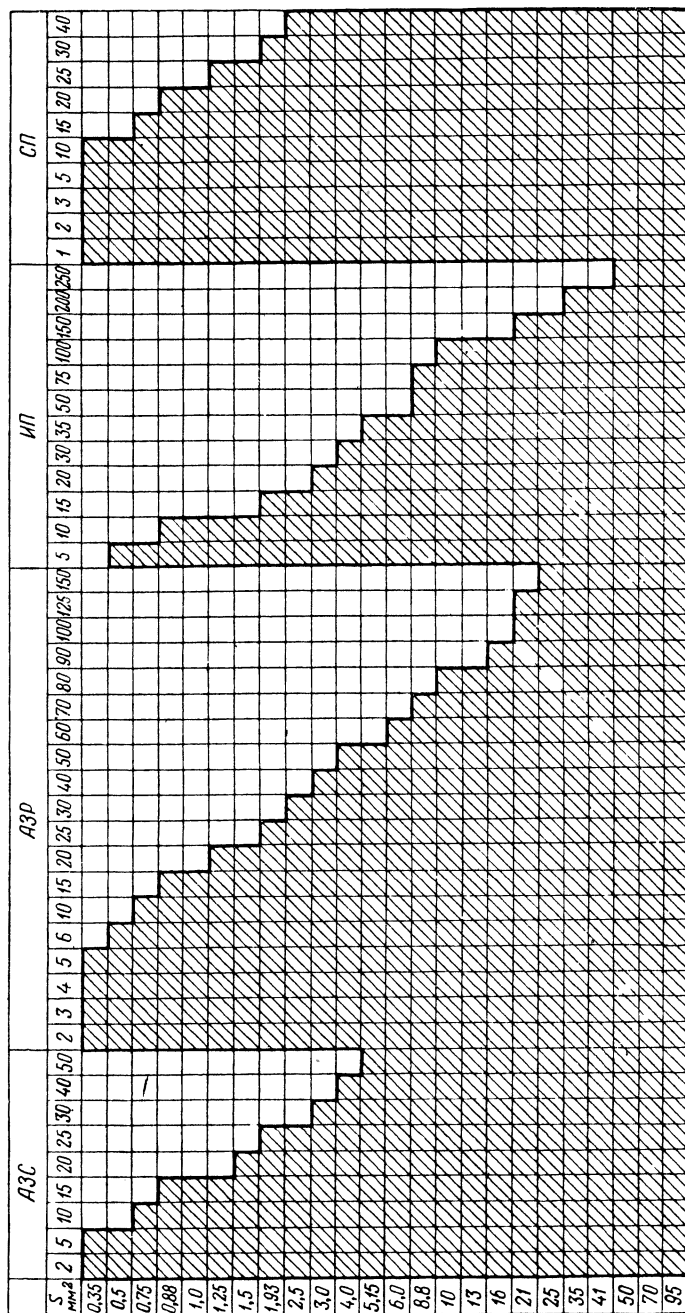


Рис. 2.5. График согласования защиты и проводов БПВЛ при $t_{\text{окр}} = \text{от } -60^\circ \text{ до } +50^\circ \text{C}$

Для переменного тока предусматриваются однофазные автоматы защиты напряжением 27, 115 и 200 в и трехфазные напряжением 200 в; последние при перегрузке одной фазы разывают все три. Разработаны модификации трехфазных автоматов защиты, реагирующие как на перегрузки тока, так и на обрыв фаз. Такие автоматы необходимы для защиты трехфазных двигателей, запуск которых с оборванной фазой приводит к перегреву. Эти автоматы защиты оборудуются дистанционным управлением от сети переменного тока или от оперативной сети постоянного тока.

Использование автоматов для защиты питательных сетей постоянного тока лимитируется разрывной мощностью их контактов.

Однако, учитывая значительное снижение величины токов к. з. и улучшение условий коммутаций в цепях переменного тока в сравнении с цепями постоянного тока, следует ожидать широкого применения автоматов защиты в системах переменного тока. Тем не менее необходимо дальнейшее усовершенствование конструкций автоматов защиты для упрощения их, повышения стабильности параметров, уменьшения переходных сопротивлений и увеличения разрывной способности контактов.

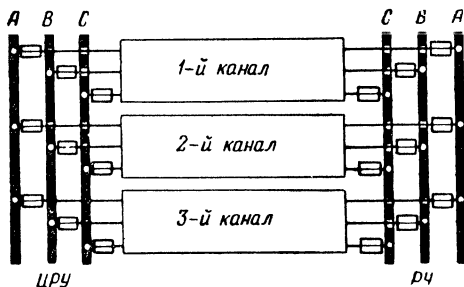


Рис. 2.6. Схема защиты питательной сети трехфазного переменного тока

В максимально-токовой защите отсутствуют дополнительные подвижные элементы (реле и контакторы), вспомогательные провода и мертвые зоны. Максимально-токовая защита проста, малогабаритна и удобна в эксплуатации, обладает необходимым быстродействием и высокой надежностью.

На рис. 2.6 приведена схема защиты питательной сети трехфазного переменного тока плавкими предохранителями или биметаллическими автоматами (обычными или с токовой отсечкой). Каждая фаза расщепляется на три параллельных линии, имеющих двустороннюю защиту. Три линии обеспечивают селективное срабатывание двусторонней защиты при коротких замыканиях между фазами и отдельных фаз на корпус (если нейтраль заземлена), после чего линия с к. з. изолируется от сети.

Расщепление каждой фазы по трем каналам и сочетание в каждом кабеле трех фаз снижает помехи радиооборудованию от системы переменного тока, а при повреждении одного кабеля симметрия сохраняется по всем трем фазам.

В трехканальной питательной сети с двусторонней защитой каждого канала можно применять плавкие предохранители, однофазные и трехфазные автоматы.

§ 4. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ЗАЩИТА ПИТАТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Продольная дифференциальная защита сети переменного тока с циркулирующими токами в однолинейном изображении представлена на рис. 2.7. В начале и в конце защищаемой цепи установлены трансформаторы тока

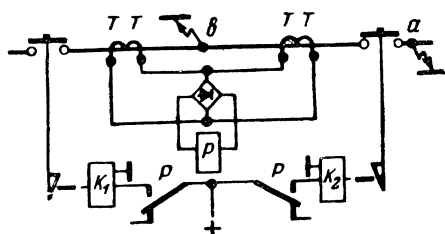


Рис. 2.7. Продольная дифференциальная защита сети переменного тока с циркулирующими токами

ТТ, вторичные обмотки которых включены согласно. ТТ предназначены для изоляции вторичных цепей от системы первичного тока и уменьшения тока в цепях защиты.

Во вспомогательных проводах, соединяющих вторичные обмотки ТТ, циркулируют токи, равные вторичным токам ТТ. В нормальном режиме работы и при коротком замыкании вне защищаемого участка (точка а) вторичные токи складываются.

При этом в обмотке реле Р, включенной параллельно вторичным обмоткам трансформаторов, ток близок к нулю. При коротком замыкании в зоне защиты (точка б) фаза тока в одном из трансформаторов тока меняется на 180° (при двустороннем питании) или один из первичных токов становится равным нулю (при одностороннем питании). При этом в обмотке реле Р появляется ток, реле срабатывает и снимает контакторы K_1 и K_2 с защелок. Поврежденный участок сети отключается. Обрыв или к. з. вспомогательного провода может привести к ложному срабатыванию защиты. По этим причинам такая защита на л. а. не получила практического применения.

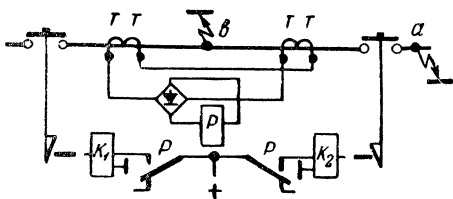


Рис. 2.8. Продольная дифференциальная защита сети переменного тока с уравновешенными напряжениями

Продольная дифференциальная защита сети переменного тока с уравновешенными напряжениями в однолинейном изображении представлена на рис. 2.8. Вторичные обмотки трансформаторов тока включены встречно и последовательно с обмоткой реле Р. В нормальном режиме работы или коротком замыкании вне зоны защиты (точка а) вторичные напряжения трансформаторов тока взаимно уравновешиваются ($E_1 = E_2$) и ток в обмотке реле близок к нулю. При коротком замыкании в зоне действия защиты (точка б) равновесие вторичных напряжений нарушается ($E_1 \neq E_2$),

и в обмотке реле появляется ток. Реле срабатывает и отключает защищаемый участок сети. Обрыв вспомогательных проводов не приводит к ложному срабатыванию защиты.

Общим недостатком указанных защит является необходимость прокладки вспомогательных проводов вдоль защищаемого участка линии и наличия оперативной сети постоянного тока.

Поперечная дифференциальная защита сети переменного тока в однолинейном изображении представлена на рис. 2.9. Каждая фаза расщепляется на два параллельных участка. С обоих концов защищаемого участка включены транс-

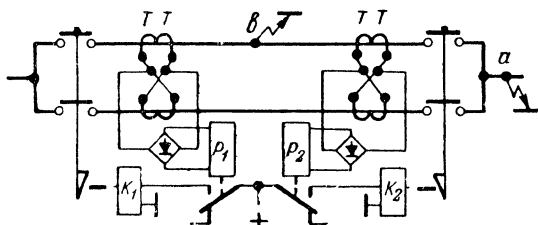


Рис. 2.9. Поперечная дифференциальная защита сети переменного тока

форматоры тока. При нормальной работе и внешних к. з. вторичные токи трансформаторов тока складываются (схема с циркулирующими токами), ток в обмотках реле Р близок к нулю и защита не срабатывает.

При коротком замыкании одной цепи в зоне действия защиты равенство токов в обмотках трансформаторов нарушается, в обмотках реле Р появляется ток, реле срабатывают и освобождают защелки. Контактors отключают поврежденный участок от сети с двух сторон, благодаря чему исключаются мертвые зоны.

Основными недостатками этой защиты в сравнении с продольной являются ее громоздкость и увеличенный ток небаланса.

Токи небаланса в схемах поперечных дифференциальных защит могут иметь большие значения, чем в схемах продольных защит, что объясняется наличием, кроме тока небаланса, обусловленного погрешностями ТТ, дополнительной слагающей тока небаланса, определяемой неравенством сопротивлений параллельных линий.

Поперечная дифференциальная защита достаточно чувствительна. В отличие от продольной она реагирует не на полный ток к. з. в месте повреждения, а на разность токов. Чувствительность поперечных защит снижается из-за неодинакового сопротивления параллельных линий.

Надежность поперечных дифференциальных защит выше, чем продольных из-за отсутствия вспомогательных проводов.

Выбор тока срабатывания дифференциальной защиты определяется следующим:

1. Защита должна надежно срабатывать при к. з. в защищаемой зоне. Это значит, что ток срабатывания защиты $I_{с.з}$ должен быть равен или меньше минимального тока к. з. в зоне защиты. Обычно для надежного действия защиты принимают

$$I_{с.з} = (0,6—1,3) I_{к.з \min}.$$

Минимальный ток к. з. получается при одностороннем питании защищаемого участка сети от одного генератора.

2. Защита не должна срабатывать при внешних к. з. и нормальных режимах работы. Это значит, что ток срабатывания реле должен быть больше так называемых токов небаланса $I_{нб}$, протекающих по реле при указанных выше условиях и обусловленных неодинаковыми характеристиками трансформаторов тока:

$$I_{р.ср} > I_{нб \max}.$$

Ток небаланса оказывается тем больше, чем больше ток внешнего к. з.

Роль переходных сопротивлений контактов в общем сопротивлении линии меньше, чем в цепях постоянного тока, что облегчает настройку защиты и позволяет повысить ее чувствительность.

§ 5. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ЗАЩИТА ТРЕХФАЗНЫХ СЕТЕЙ НА СУММАТОРАХ

Как уже отмечалось для защиты трехфазной сети, имеющей одностороннее или двустороннее питание, с точки зрения селективности и скорости действия используется дифференциальный принцип защиты, основанный на сравнении токов (или напряжений пропорциональных им), проходящих через защищаемый участок.

Сравнение токов в каждой из фаз в отдельности усложняет защиту за счет большого числа трансформаторов, поэтому целесообразнее преобразовывать трехфазный ток или напряжение в однофазный с последующим его сравнением.

Преобразовывать трехфазный ток в однофазный можно фильтрами симметричных составляющих или сумматорами (последние проще и поэтому находят большее применение).

Сумматор представляет собой трансформатор тока, суммирующий м. д. с. одной или нескольких фаз.

Для защиты трехфазной сети переменного тока с заземленной нейтралью используются сумматоры, в которых провода одной фазы проходят в окно сумматора в обратном направлении, второй фазы — в прямом направлении, а третьей фазы — в прямом направлении два раза (см. рис. 2.11).

При одинаковом исполнении сумматоров векторные диаграммы результирующих токов их первичных обмоток при нормальной работе одинаковы. При этом одинаковы э. д. с. вторичных обмоток, которые наводятся потоками соответствующих токов пер-

вичных обмоток, а результирующая э. д. с. встречного включения вторичных обмоток равна нулю и ток в цепи реле Р отсутствует.

Векторная диаграмма токов сумматора при нормальной работе и равенстве токов во всех трех фазах представлена на рис. 2.10, а.

При рассмотрении коротких замыканий токами нагрузок пренебрегаем и считаем, что ток имеет чисто индуктивный характер и, следовательно, отстает от соответствующих э. д. с. на 90° .

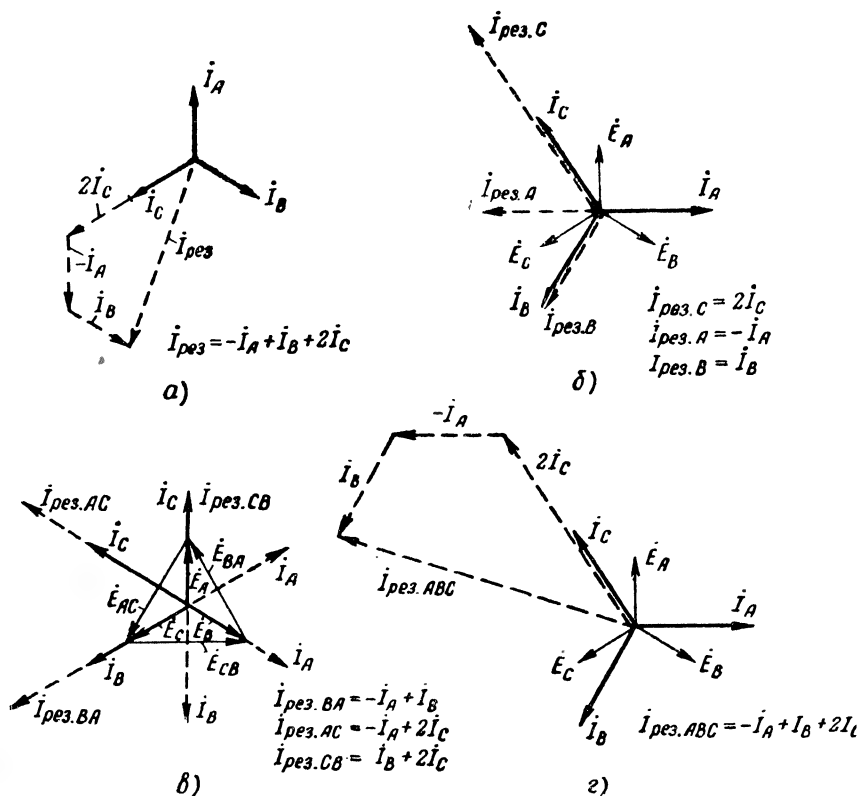


Рис. 2.10. Векторные диаграммы токов сумматора при различных видах к. з.

На рис. 2.10, б представлены векторные диаграммы результирующих первичных токов в сумматоре при однофазных к. з. фаз A, B, C . На рис. 2.10, в — двухфазных к. з. фаз A и B, B и C, A и C и на рис. 2.10, г — трехфазного к. з. фаз A, B, C для сети с генератором переменного тока с независимым возбуждением.

Векторные диаграммы показывают, что в зависимости от вида к. з. результирующие токи сумматора различны (см. табл. 2.1).

Из таблицы следует, что наименьшую чувствительность защита на сумматорах имеет при к. з. фаз B и C , поэтому такое к. з. берется за основу при расчете подобной защиты.

Виды к. з.	Примерное значение результирующего тока сумматора	Виды к. з.	Примерное значение результирующего тока сумматора
Однофазное к.з. фазы <i>A</i>	$5I_{\text{НОМ}}$	Двухфазное к.з. фаз <i>A</i> и <i>B</i>	$7I_{\text{НОМ}}$
Однофазное к.з. фазы <i>B</i>	$5I_{\text{НОМ}}$	Двухфазное к.з. фаз <i>A</i> и <i>C</i>	$10,5I_{\text{НОМ}}$
Однофазное к.з. фазы <i>C</i>	$10I_{\text{НОМ}}$	Двухфазное к.з. фаз <i>B</i> и <i>C</i>	$3,5I_{\text{НОМ}}$
		Трехфазное к.з.	$7,8I_{\text{НОМ}}$

Для защиты сетей с изолированной нейтралью используются аналогичные сумматоры, только одна фаза в окно не заводится, а две другие пропускаются через окно встречно.

На сумматорах возможны три вида защиты: продольная, поперечная и поперечно-продольная.

Продольная дифференциальная защита сети основана на сравнении величин токов или напряжений на выходе сумматоров, установленных по

концам защищаемого участка (рис. 2.11). При отсутствии повреждения в зоне защиты суммарное напряжение в замкнутом контуре, состоящем из последовательно соединенных обмоток сумматоров, соединительных проводов и выпрямителя, питающего обмотку реле *P*, равно нулю. При коротком замыкании на защищаемом участке баланс напряжений

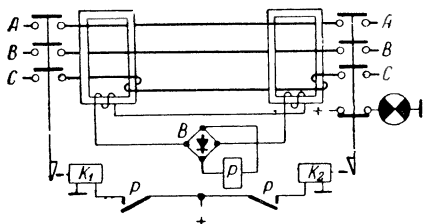


Рис. 2.11. Продольная дифференциальная защита сети на сумматорах с уравновешенными напряжениями

нарушается, через реле проходит ток и линия отключается с обеих сторон. Отключение контактора сигнализируется с помощью блок-контакта, замыкающегося при его отключении. Для отключения линии при повреждении используется контактор с защелкой, а не контактор с удерживающей обмоткой постоянного тока. Защелка устраняет возможность ложного отключения контактора при потере питания вследствие обрыва или других повреждений в системе защиты.

Во избежание ложного отключения ток срабатывания реле *P* должен быть больше тока, могущего возникнуть в нормальном

режиме, если вспомогательные соединительные провода замкнутся друг с другом. Отстройка защиты по току нагрузки не предохраняет от неселективного действия при внешнем коротком замыкании, что является основным недостатком данного типа защиты.

Поперечная дифференциальная защита сети (рис. 2.12). Расщепленные провода фаз защищаемой линии проведены через окно сумматора таким образом, что в обмотке наводится напряжение, пропорциональное разности токов проводов фаз.

При отсутствии повреждения в защищаемой зоне напряжение, наводимое в обмотке сумматора, равно нулю. При коротком замы-

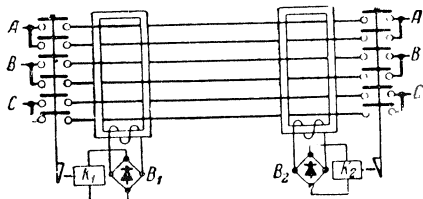


Рис. 2.12. Поперечная дифференциальная защита сети на сумматорах (принципиальная схема)

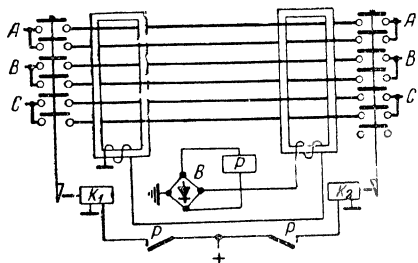


Рис. 2.13. Поперечно-продольная дифференциальная защита сети на сумматорах с уравновешенными напряжениями

канию на защищаемом участке баланс магнитных потоков нарушается и под воздействием возникшего напряжения реле отключают контакторы на обоих концах линии.

Недостатком защиты является возможность ложного отключения защищаемого участка, имеющего обрыв в одном из расщепленных проводов, при внешнем коротком замыкании. Чем меньше длина защищаемого участка, тем больше ток небаланса при сквозных внешних коротких замыканиях, обусловленный неравенством сопротивлений переходных контактов.

Поперечно-продольная защита сети устраняет недостатки продольной и поперечной дифференциальных защит. Вариант схемы представлен на рис. 2.13. Существенной особенностью схемы является то, что напряжение на ее выходе, питающем реле, отсутствует при повреждении соединительных проводов или при обрыве любого из расщепленных проводов.

Напряжение на выходе сумматоров не зависит от состояния соединительных проводов и практически равно нулю при отсутствии коротких замыканий или обрывов на защищаемом участке сети. При обрыве одного из расщепленных проводов напряжения, возникающие на выходе сумматоров, уравниваются соединительными проводами.

Отсутствие ложных срабатываний при коротких замыканиях вторичных проводов позволяет использовать обшивку самолетов в качестве второго вспомогательного провода.

Глава III

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

§ 1. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Электрическая сеть формируется и рассчитывается на всех этапах проектирования (эскизного, технического, рабочего) и постройки опытного образца. На этапе эскизного проектирования в основном рассчитывается ряд вариантов различных конфигураций питательной сети для получения максимальной надежности и минимального веса, а расчеты распределительной сети выполняются при рабочем проектировании и уточняются в процессе постройки и испытаний летательного аппарата.

На основании технических параметров и данных о взаимном расположении источников и потребителей электрической энергии намечаются места установки распределительных устройств и пультов, а также прокладки трасс сетей с указанием длин, сечений и сопротивлений проводов, величины переходных сопротивлений контактных соединений и защитных устройств. Сечения проводов определяются в соответствии с нормами по допустимому их нагреву и минимально допустимым напряжениям источников и потребителей электроэнергии в нормальных и аварийных режимах эксплуатации.

Расчеты электрических сетей подразделяются на три вида:

Тепловые — на допустимую нагрузку с учетом высоты, скорости полета и окружающей температуры.

Электрические — на токораспределение, допустимые потери напряжения в нормальном режиме и токи короткого замыкания в аварийном режиме.

Специальные — на эксплуатационно выгодные плотности тока и потери напряжения, минимум полетного веса сети и с учетом параллельной работы генераторов. При расчете следует учитывать ряд факторов:

1. Режим работы — длительный, кратковременный или повторно-кратковременный.

2. Условия прокладки проводов — одиночные или в жгуте, открытые или в коробах и трубах.

3. Условия окружающей среды, места расположения (например, на авиадвигателе), скорость и высоту полета.

4. Условия охлаждения — естественное или продув.

5. Материал токопроводящей жилы — медь или алюминий.

6. Изоляция проводов — винил, винифлекс, стекловолокно, фторопласт и другие, допускающие различную температуру нагрева.

7. Согласование наибольшей токовой нагрузки проводов с типом защиты: плавкой, инерционной, биметаллической, дифференциальной и другими разновидностями.

8. Нагрев от установившихся и ударных токов короткого замыкания.

9. Потери напряжения в номинальных, пусковых и аварийных режимах.

10. Параллельную работу генераторов.

11. Потери мощности в сети.

При расчете проводов на допустимую нагрузку определяется их сечение, при котором температура нагрева не превышает допустимой по нормам для выбранного типа. Из условия механической прочности минимальное сечение проводов выбирается $0,35 \text{ мм}^2$.

При расчете проводов на допустимую потерю напряжения определяется минимальное их сечение, при котором обеспечивается нормальная работа потребителей электрической энергии в номинальном, пусковом и аварийном режимах эксплуатации. Исходными данными при расчете сети на потерю напряжения являются: минимальное напряжение источников энергии, точность работы регулятора напряжения, протяженность сети, сопротивление переходных контактов и минимально допустимое напряжение на клеммах потребителей.

Для выполнения расчета сети на допустимые нагрузки и потери напряжения необходимо знать токораспределение в отдельных цепях сети л. а. при возможных эксплуатационных режимах работы источников и потребителей электроэнергии, включая и аварийные режимы.

В питательных сетях простых конфигураций распределение тока по шинам находится легко.

Задача расчета сложных замкнутых электрических сетей в общем случае является неопределенной из-за трудностей нахождения распределения токов по отдельным участкам замкнутой питательной сети.

Такие сети рассчитывают методом последовательных приближений, т. е. сначала предварительно задаются сечениями отдельных участков питательной электрической сети и рассчитывают токораспределения. Затем на основании найденного токораспределения, исходя из допустимых потерь напряжения, определяют сечения проводов.

Если найденные сечения близки к предварительно выбранным, то на этом расчет заканчивается, если же имеются расхождения, то необходимо задаться новыми сечениями проводов и весь расчет провести снова.

Таким образом расчеты, сложных питательных сетей выполняются приближенно и окончательно проверяются и подправляются по результатам стендовых испытаний всей энергосистемы с реальными длинами, сечениями и конфигурациями проводов, переходными контактами, источниками энергии и основными потребителями. При таких испытаниях уточняются сечения проводов, типы и номинальные параметры защиты.

Опыт показывает, что при правильном выборе конфигурации питательной сети и защиты в процессе проектирования, практически после стендовых испытаний уточняются только отдельные предохранители с учетом селективности срабатывания. Однако стендовые испытания необходимы и полезны для проверки бесперебойности электроснабжения потребителей в условиях аварийных ситуаций, возможных при эксплуатации л. а.

Расчет аварийных режимов питательной сети сложен, трудоемок и весьма приближенно отражает действительность, так как не может учесть всех факторов и поэтому выполняется ориентировочно с минимальной затратой времени. Основные аварийные режимы проверяются при наземных испытаниях на натуральном стенде.

§ 2. КАЧЕСТВО И ДОПУСТИМЫЕ ПОТЕРИ НАПРЯЖЕНИЯ В СЕТИ

Величина и стабильность напряжения на зажимах потребителей, как один из главных факторов надежности, должны находиться в допустимых пределах при всех условиях эксплуатации.

Отклонения напряжения на зажимах потребителя от номинального значения зависят от точности работы и точки присоединения регулятора напряжения и потери напряжения в питательной и распределительной сетях, которые в свою очередь зависят от системы распределения электрической энергии.

За номинальное напряжение генераторов постоянного тока принимается напряжение, равное 28,5 в, которое соответствует напряжению в точке присоединения рабочей обмотки регулятора напряжения и изменяется в полете в зависимости от скорости вращения генератора, нагрузки сети и других факторов:

$$\Delta U_{\Gamma} = U_{\Gamma \max} - U_{\Gamma \min}.$$

Угольные регуляторы без приставки точного регулирования обеспечивают в большинстве случаев эксплуатационный диапазон напряжения генераторов $28,5 \pm 1,2$ в, т. е. $\Delta U_{\Gamma} = 29,7 - 27,3 = 2,4$ в.

За номинальное напряжение на зажимах потребителей принимается напряжение, равное 27 в, с допустимым отклонением $\pm 10\%$, т. е.

$$\Delta U_{\text{п. доп}} = 29,7 - 24,3 = 2,7 \times 2 = 5,4 \text{ в.}$$

Потери в сети определяются

$$\Delta U_{\text{с}} = \Delta U_{\text{п. доп}} - \Delta U_{\Gamma} = 5,4 - 2,4 = 3 \text{ в.}$$

Очевидно, что потери напряжения в сети без ущерба для качества электроснабжения могут быть увеличены путем повышения точности работы регулятора напряжения. Если регулятор напряжения поддерживает напряжение с точностью $\pm 0,5$ в, то допустимые потери напряжения в сети составляют

$$\Delta U_c = 5,4 - 1,0 = 4,4 \text{ в,}$$

что соответственно обеспечивает снижение веса сети. При сохранении прежнего значения $\Delta U_c = 3$ в повышение точности работы

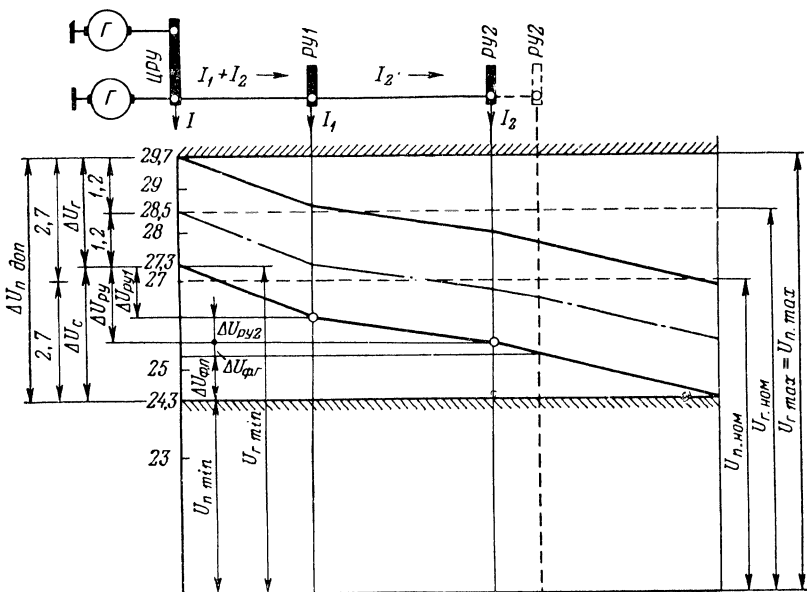


Рис. 3. 1. График распределения допустимой потери напряжения в питающей и распределительной сетях

регуляторов напряжения позволяет повысить качество электроснабжения:

$$\Delta U_{\text{н доп}} = \Delta U_{\text{г}} + \Delta U_c = 1 + 3 = 4 \text{ в,}$$

т. е. отклонение напряжения на зажимах потребителей будет ± 2 в или $\pm 7,4\%$, что заметно скажется на улучшении работы аппаратуры, особенно радиотехнической.

На рис. 3.1 изображены области возможных напряжений на шинах распределительных устройств и зажимах потребителей при точности работы регуляторов напряжения $\Delta U_{\text{г}} = 2,4$ в и различных системах распределения электрической энергии. Из графика следует:

1. Во всех системах распределения электрической энергии напряжение на шинах ЦРУ поддерживается постоянным с точностью

работы регулятора напряжения, если его рабочие обмотки присоединяются непосредственно к шинам ЦРУ.

Потребители, подключенные к этим шинам в пределах рабочей зоны, могут получить номинальное напряжение. Так как потери напряжения в питательной сети компенсируются регулятором напряжения, а потери в фидере потребителя зависят только от его потребляемой мощности, то, если эта мощность постоянна, выбором сечения проводов можно обеспечить номинальное напряжение данного потребителя.

2. В смешанной и децентрализованной системах распределения электрической энергии, на всех распределительных шинах РУ колебание напряжения зависит как от точности работы регуляторов напряжения, так и от количества одновременно включенных потребителей по всем шинам, поэтому качество питания потребителей с этих шин хуже, чем с первичных. Таким образом, напряжение на зажимах потребителей, подключенных к этим шинам, зависит от точности работы регулятора напряжения, потери напряжения в питательной сети и в фидере потребителя.

3. При подключении обмотки регулятора напряжения непосредственно на плюсовую клемму генератора на шинах ЦРУ напряжение также будет изменяться в зависимости от количества и мощности включенных потребителей.

§ 3. РАСЧЕТ СЕЧЕНИЙ ПРОВОДОВ НА ДОПУСТИМЫЕ НАГРУЗКИ И ПОТЕРИ НАПЯЖЕНИЯ

Расчет проводов на допустимые нагрузки (нагрев) представляет значительные трудности, так как один и тот же провод на своем пути может находиться в различных окружающих условиях, поэтому на практике вместо расчета производится выбор сечения проводов по таблицам допустимых нагрузок, которые составлены на основании результатов экспериментальных исследований в условиях, близких к эксплуатационным.

Для длительного режима работы сечения проводов выбирают в соответствии с неравенством

$$I_{\text{доп}} \geq I_{\text{max}},$$

где $I_{\text{доп}}$ — допустимый ток провода, взятый из таблицы;

I_{max} — наибольший ток нагрузки провода.

В табл. 3.1 приведены нормы допустимых нагрузок на провода марки БПВЛ.

Для кратковременного и повторно-кратковременного режимов работы при одной и той же допустимой температуре нагрева нагрузка на провода может быть взята значительно большей и определяется в зависимости от времени работы по специальным графикам (рис. 3.2).

Нормы допустимых нагрузок проводов марки БПВЛ и БПВЛЭ

Сечение про- вода мм ²	БПВЛ и БПВЛЭ										БПТ и БПТЭ
	Наружный диаметр мм		Расчетный вес кг/км		Активное со- противление ом/км	I доп. одиноч. провод а	I доп. провод в жгуте а	Кратковремен- ная перегрузка мин.			Активное со- противление ом/км
	БПВЛ	БПВЛЭ	БПВЛ	БПВЛЭ				150%	200%	300%	
0,35	2,3	2,9	7,5	20	58,0	10	6	—	—	—	58,0
0,5	2,5	3,1	10,0	23,0	41,3	13	9	—	—	—	41,3
0,75	2,7	3,3	13,0	29,0	26,8	16	11	—	—	—	26,8
0,88	2,8	3,4	15,0	32,0	22,8	18	13	—	—	—	Не изго- товляется
1,0	3,0	3,6	16,5	33,0	20,5	20	14	0,5	—	—	20,5
1,25	3,1	3,9	20,0	50,0	16,3	22	16	0,6	—	—	Не изго- товляется
1,5	3,4	4,2	23,0	61,0	13,3	25	18	0,65	—	—	13,3
1,93	3,6	4,4	30,0	62,0	10,42	30	22	0,75	—	—	Не изго- товляется
2,5	3,9	4,7	35,0	68,0	8,0	35	25	0,85	—	—	8,0
3,0	4,1	4,9	42,0	77,0	6,58	40	28	1,0	0,5	—	Не изго- товляется
4,0	4,7	5,5	50,0	86,0	5,0	48	35	1,0	0,5	—	5,0
5,15	5,1	5,9	70,0	110,0	3,58	55	40	1,3	0,65	—	Не изго- товляется
6,0	5,4	6,2	72,0	114,0	3,3	60	45	1,5	0,75	—	3,3
8,8	6,2	7,0	112,0	158,0	2,4	75	56	1,8	0,9	—	2,4
10,0	6,9	8,1	126,0	196,0	2,0	82	63	2,0	1,0	—	2,0
13,0	7,5	8,7	165	237	1,5	97	75	2,3	1,2	—	Не изго- товляется
16,0	8,0	9,2	178	261	1,2	110	85	2,6	1,3	—	1,2
21,0	8,9	10,1	250	335	0,96	130	100	3,0	1,5	0,5	Не изго- товляется
25,0	9,5	10,7	270	360	0,8	150	114	3,3	1,65	0,55	0,8
35,0	11,1	12,3	370	477	0,57	180	140	4,1	2,0	0,7	0,57
41,0	12,0	13,2	470	597	0,49	200	155	4,5	2,2	0,75	Не изго- товляется
50,0	13,0	14,2	515	634	0,4	225	175	5,0	2,5	0,83	0,4
70,0	14,5	15,7	690	815	0,29	280	220	6,0	3,0	1,0	0,29
95,0	17,0	18,2	952	1100	0,20	340	270	7,2	3,6	1,2	Не изго- товляется

На летательных аппаратах применяются медные и алюминиевые провода. При одних и тех же токовых нагрузках и потерях напряжения применение алюминиевых проводов вместо медных снижает вес сети в 2 раза [10]. Теплоемкость алюминия в три раза больше меди, что позволяет допускать большую нагрузку на алюминиевые провода в кратковременных и повторно-кратковременных режимах.

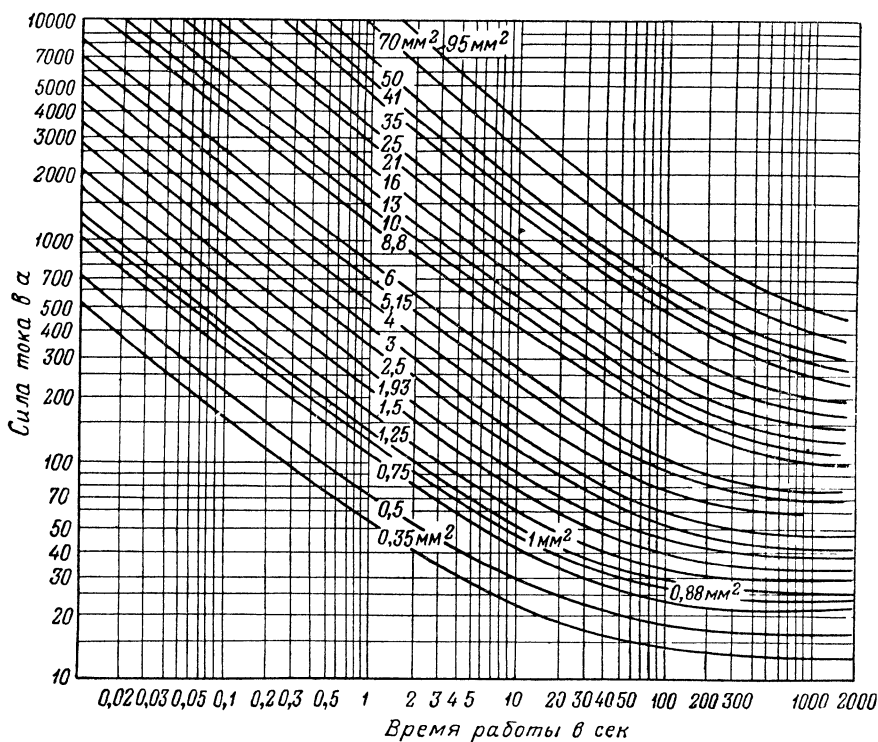


Рис. 3.2. График предельных перегрузочных характеристик свободно подвешенных проводов БПВЛ при температуре $+20^{\circ}\text{C}$ в наземных условиях

Алюминиевые провода по сравнению с медными имеют и недостатки: увеличенное сечение, быстрое окисление, приводящее к увеличению сопротивления между контактами, в два раза меньшее временное сопротивление разрыву и большая степень потери механической прочности при нагреве.

Алюминиевые провода применяются в силовых цепях питательных сетей, где дают наибольший выигрыш в весе сети.

При расчете электрических сетей по допустимой потере напряжения вводятся два понятия — падение и потеря напряжения. *Падение напряжения* — геометрическая разность напряжений в начале и в конце линии, а *потеря напряжения* — их алгебраическая

разность. Для постоянного тока эти два понятия совпадают. Величина потери напряжения в линии постоянного тока определяется суммой падений напряжений на всех сопротивлениях (R), через которые протекает ток I :

$$\Delta U = I \cdot \sum_{k=1}^n R_k.$$

При одной и той же величине передаваемой мощности и напряжения ток в сети переменного тока в $\frac{1}{\cos \varphi}$ раз больше тока в сети постоянного, поэтому расчет сети переменного тока нужно вести, исходя из полного (кажущегося) тока.

Величина потери напряжения в линии переменного тока определяется выражением

$$\Delta U = I(R \cdot \cos \varphi + X \cdot \sin \varphi) = I_a R + I_p X,$$

где I — полный ток;
 R и $X = \omega L$ — активное и реактивное сопротивление линии.
 Индуктивность для двухпроводной линии

$$L = \left(0,92 \lg \frac{A}{r} + 0,1\right) \cdot 10^{-3} \text{ гн/км},$$

где A — расстояние между проводами;
 r — радиус провода.

Для однопроводной линии вместо A берется удвоенное расстояние провода от корпуса л. а.

Индуктивность одной фазы трехфазной линии выражается

$$L = \left(0,46 \lg \frac{A_{cp}}{r} + 0,05\right) \cdot 10^{-3} \text{ гн/км}.$$

Среднее геометрическое расстояние между проводами

$$A_{cp} = \sqrt[3]{A_1 \cdot A_2 \cdot A_3},$$

где A_1, A_2, A_3 — расстояние между соответствующими фазовыми проводами.

При ориентировочных расчетах сети реактивное сопротивление проводов переменному току принимается равным $(1 \div 2) \cdot 10^{-3} \text{ ом/м}$.

Переходные сопротивления контактов оказывают существенное влияние на потери напряжения в сети. Это особенно сказывается при использовании проводов большого сечения и корпуса л. а. в качестве одного из проводов. Точный учет переходного сопротивления затруднителен, поэтому при расчетах ориентировочно принимают величины, приведенные в табл. 3.2.

Величины переходных сопротивлений

Тип контактного соединения	Величина переходного сопротивления ОМ	Тип контактного соединения	Величина переходного сопротивления ОМ
Болтовое соединение	$(0,5—1,0) 10^{-3}$	Автоматы защиты	$(0,9—52,7) 10^{-3}$
Штепсельное соединение	$(0,15—2,5) 10^{-3}$	Инерционные предохранители	$(0,15—1,4) 10^{-3}$
Контакты контакторов	$(0,32—0,64) 10^{-3}$	Тугоплавкие предохранители	$(0,03—0,34) 10^{-3}$
Контакты реле и выключателей	$(3,0—15,0) 10^{-3}$	Плавкие предохранители	$(1,2—26) 10^{-3}$

При расчете сети схему принято чертить в однолинейном изображении. При двухпроводной схеме передачи для учета сопротивления обратного провода длину рассчитываемой линии необходимо удваивать. В однопроводной схеме сопротивлением обратного провода (корпуса л. а.) можно пренебречь.

Расчет сети начинается с предварительного определения токо-распределения по узловым точкам. Сеть условно приводится к радиальной с сосредоточенными нагрузками по распределительным шинам. Далее по известным величинам: токов I , длин проводов l и допустимых падений напряжения $\Delta U_{\text{доп}}$ определяются сечения проводов S по участкам сети.

Для постоянного тока

$$S = \frac{Il}{\gamma \Delta U'_{\text{доп}}},$$

где $\Delta U'_{\text{доп}}$ — расчетная допустимая потеря напряжения в проводе;
 I — ток нагрузки;

$$\Delta U'_{\text{доп}} = \Delta U_{\text{доп}} - \Delta U_k,$$

где $\Delta U_{\text{доп}}$ — общая допустимая потеря напряжения рассчитываемого участка сети;

ΔU_k — потеря напряжения в переходных контактах сети.

Для переменного тока при малой протяженности сети индуктивным сопротивлением можно пренебречь. Тогда будем иметь

$$S = \frac{2Il}{\gamma \Delta U'_{\text{доп}}} \cos \varphi \text{ — для однофазного тока;}$$

$$S = \frac{\sqrt{3}Il}{\gamma \Delta U'_{\text{доп}}} \cos \varphi \text{ — для трехфазного тока,}$$

где I — кажущийся ток.

Из формул очевидно, что при передаче одной и той же мощности в однофазной сети переменного тока общая потеря напряжения равна удвоенной потере напряжения в одном проводе, а в сети трехфазного тока при равномерной нагрузке она лишь в 1,73 раза больше потери напряжения в одном проводе. Это объясняется тем, что при равномерной нагрузке трех фаз ток в нулевом проводе отсутствует. При неравномерной нагрузке трехфазной сети в нулевом проводе будет протекать ток, но потерей напряжения в нем можно пренебречь, так как нулевым проводом служит корпус л. а.

Если при расчете необходимо учитывать индуктивное сопротивление провода, то $\Delta U'_{\text{доп}}$ берется уменьшенным на величину потери напряжения в реактивном сопротивлении, т. е. на величину $I_p X$.

Если заменить силу тока I ее значением

$$I = \frac{P}{U \cos \varphi} \text{ — для однофазного тока;}$$

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} U_{\text{л}} \cos \varphi} \text{ — для трехфазного тока}$$

и выразить ΔU в процентах по отношению к U , т. е.

$$\Delta U = \frac{\varepsilon U}{100},$$

где U — напряжение на зажимах потребителя;

ε — потери напряжения в %,

то окончательно

$$S = \frac{2Pl}{\gamma \varepsilon U^2} \cdot 100 = \frac{200Pl}{\gamma \varepsilon U^2} \text{ — для однофазного тока;}$$

$$S = \frac{Pl}{\gamma \varepsilon U_{\text{л}}^2} \cdot 100 \text{ — для трехфазного тока.}$$

Из формул видно, что сечение проводника обратно пропорционально квадрату напряжения, поэтому для уменьшения сечения проводников (снижения веса) рекомендуется повышать напряжение.

§ 4. ВЛИЯНИЕ ТОЧНОСТИ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ НА РАСЧЕТ ПИТАТЕЛЬНОЙ СЕТИ

При проектировании энергетических систем должен быть рассмотрен ряд связанных между собой факторов: надежность, минимальный вес, точность регулирования напряжения, сложность регулирующей аппаратуры, конфигурация, канальность и защита питательной сети, а также рациональность загрузки шин распределительных устройств.

Точность регулирования напряжения позволяет значительно снизить вес сети за счет увеличения допустимого в ней падения на-

пряжения. Но увеличение точности целесообразно до определенного предела, т. е. до момента, когда это сопровождается выигрышем веса в проводах сети. В зависимости от типа самолета, конфигурации распределительной сети и токовой нагрузки на шинах распределительных устройств определяется оптимальная точность регулирования уровня напряжения, обеспечивающая минимальный вес энергосистемы.

Повышение точности регулирования напряжения выше оптимальной не дает снижения веса проводов питательной сети, а приводит к конструктивному усложнению регулирующей аппаратуры и к снижению надежности работы всей энергосистемы.

Если точность регулирования напряжения не учитывается или неправильно используется при расчетах номинальных и аварийных режимов работы питательной сети, то это приводит к резкому снижению срока службы потребителей, а иногда из-за питания некачественной электроэнергией и к выходу их из строя.

Под аварийным режимом работы питательной сети понимается выход из строя одной или нескольких линий многоканальной системы. При отказе одной линии качество питания потребителей не должно существенно ухудшаться и только при вторичном повреждении питательной сети на том же участке потребители электроэнергии, питающиеся с данного распределительного устройства, получают электроэнергию пониженного качества.

Для таких энергетических систем максимально допустимое падение напряжения в питательной сети будет определяться

$$\Delta U_{\text{py max}} = U_{\text{r min}} - (U_{\text{n min}} + \Delta U_{\text{ф.п}} + \Delta U_{\text{ф.г}}), \quad (3.1)$$

где $U_{\text{n min}}$ — минимально допустимое напряжение на клеммах потребителя;

$\Delta U_{\text{ф.п}}$ — падение напряжения в фидере потребителя;

$\Delta U_{\text{ф.г}}$ — падение напряжения в фидере генератора (от точки подсоединения регулятора напряжения до первичной распределительной шины).

Если энергосистема проектируется без учета выхода из строя питающих линий, то данное максимальное падение напряжения может быть принято за расчетное.

Если при проектировании энергосистемы учитывается возможность выхода из строя части питающих линий, то расчетным падением напряжения будет

$$\Delta U_{\text{py.расч}} = \Delta U_{\text{py. max}} \cdot \frac{n-k}{n}, \quad (3.2)$$

где n — общее число линий питания, подходящих к данному распределительному устройству;

k — число линий, вышедших из строя.

Сечение провода, питающего распределительное устройство, определяется выражением

$$S_{\text{расч}} = \frac{Il}{\gamma n \Delta U_{\text{ру.расч}}}, \quad (3.3)$$

где I — ток на шинах РУ в a ;

l — расстояние от ЦРУ до РУ в m ;

γ — удельная проводимость проводника в $m/\text{ом} \cdot \text{мм}^2$.

Далее по таблице проводов принимается ближайшее большее стандартное сечение $S_{\text{табл}} \geq S_{\text{расч}}$, которое проверяется по допустимому току нагрузки при аварийном режиме работы питающей сети:

$$I_{\text{доп}} \geq \frac{I_{\text{fy}}}{n - k}, \quad (3.4)$$

что гарантирует работоспособность провода при аварийном режиме работы распределительной сети.

Из выражений (3.1) и (3.3) видно, что повышение точности регулирования заданного уровня напряжения (повышение минимального напряжения генератора) позволяет значительно снизить вес питающей сети за счет увеличения в ней допустимого падения напряжения. Это будет происходить до тех пор, пока расчетное сечение проводов не будет лимитироваться максимально допустимой токовой нагрузкой.

Таким образом, чтобы создать систему электроснабжения минимального веса, необходимо проложить провода в соответствии с их допустимой токовой нагрузкой. Это возможно, если точность регулирования уровня напряжения обеспечивает необходимое падение напряжения в питающей сети.

Выясним влияние точности регулирования уровня напряжения на вес питающей сети, расчетная схема которой представлена на рис. 3.3.

В соответствии с нормалью принимается: номинальное напряжение генератора (точка подключения регулятора напряжения) $U_{\text{г.ном}} = 28,5 \text{ в}$, падение напряжения в фидере генератора $\Delta U_{\text{ф.г}} = 0,3 \text{ в}$, в фидере потребителей $\Delta U_{\text{ф.п}} = 1,0 \text{ в}$ и напряжение на клеммах потребителей $U_{\text{п}} = 27 \text{ в} \pm 10\%$, т. е. $U_{\text{п min}} = 24,3 \text{ в}$; $U_{\text{п max}} = 29,7 \text{ в}$.

За точность регулирования напряжения принимается величина $\Delta U_{\text{р}} = U_{\text{г max}} - U_{\text{г min}}$, которая в существующих регуляторах лежит в пределах $\pm (1,2 \div 2,0) \text{ в}$. При этом верхний предел напряжения генератора, равный $30,5 \text{ в}$, превышает величину, допустимую для

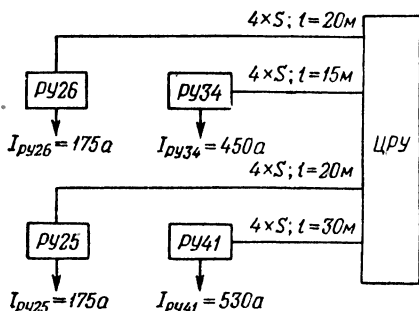


Рис. 3.3. Расчетная схема питающей сети

потребителей, что не исключает возможности перенапряжения потребителей при их одиночном включении. Однако в полете явление перенапряжения практически маловероятно из-за падения напряжения в сети. В рассматриваемом случае важна величина нижнего уровня напряжения, которая является определяющей для веса бортовой сети.

При точности регулирования $\Delta U_p = 0$ максимально допустимое падение напряжения в питательной сети

$$\Delta U_{py \max} = 28,5 - (24,3 + 1,0 + 0,3) = 2,9 \text{ в.}$$

Расчетное падение напряжения при выходе из строя одной линии

$$\Delta U_{py \text{ расч}} = 2,9 \cdot \frac{3}{4} = 2,18 \text{ в.}$$

Для распределительной шины РУ25

$$S_{m \text{ расч}} = \frac{175 \cdot 20}{50 \cdot 4 \cdot 2,18} = 8,05 \text{ мм}^2.$$

Выбираем по таблице ближайшее большее стандартное сечение

$$S_{m \text{ табл}} = 8,8 \text{ мм}^2,$$

которое проверяем по токовой нагрузке

$$I_n = \frac{175}{3} = 58,33 \text{ а,}$$

а провод $8,8 \text{ мм}^2$ выдерживает 56 а , поэтому окончательно принимается сечение $S = 10 \text{ мм}^2$. Вес магистральных линий составит

$$G_m = 4 \cdot p \cdot l = 4 \cdot 0,126 \cdot 20 = 10,1 \text{ кг.}$$

Проведем аналогичный расчет для алюминиевых проводов

$$S_{a \text{ расч}} = \frac{175 \cdot 20}{34 \cdot 4 \cdot 2,18} = 11,8 \text{ мм}^2.$$

Выбираем по таблице $S = 35 \text{ мм}^2$, которое выдерживает допустимую токовую нагрузку.

Тогда вес магистральных линий составит

$$G_{\text{алюм}} = 4 \cdot p \cdot l = 4 \cdot 0,131 \cdot 20 = 10,5 \text{ кг.}$$

Далее выполняют расчеты для РУ25 при различных точностях регулирования. Аналогично рассчитываются сечения и вес проводов других РУ и результаты расчетов заносятся в таблицу.

Определим оптимальную точность регулирования напряжения РУ для алюминиевых проводов, выбранных по допустимой токовой нагрузке.

Для РУ25 и РУ26

$$\Delta U_{\text{ру.расч}} = \frac{175 \cdot 20}{34 \cdot 4 \cdot 35} = 0,74 \text{ в};$$

$$\Delta U_{\text{ру max}} = 0,74 \cdot \frac{4}{3} = 0,985 \text{ в};$$

$$U_{\text{г min}} = 0,985 + 25,6 = 26,585 \text{ в};$$

$$\Delta U_{\text{ру25;26}} = 2(28,5 - 26,585) = 3,83 \text{ в}.$$

Аналогичным расчетом для распределительных устройств 34 и 41 получим

$$\Delta U_{\text{ру34}} = 3,91 \text{ в};$$

$$\Delta U_{\text{ру41}} = 2,5 \text{ в}.$$

Полученные точности регулирования уровня напряжения оптимальны для своих распределительных устройств. Оптимальной величиной точности регулирования для всей бортсети л. а. будет величина $\Delta U_{\text{р}} = 2,5 \text{ в}$, являющаяся наивысшей для данной распределительной сети, удовлетворяющей потребителей, питающихся с любого распределительного устройства.

Применение на данном л. а. точности регулирования выше оптимальной нерационально, так как не дает выигрыша в весе питательной сети при нормальном качестве энергии.

Из рассмотренного выше следует:

1. При проектировании систем электроснабжения тяжелых л. а. необходимо, кроме общего графика нагрузок, составлять графики нагрузок по шинам распределительных устройств. При правильном распределении нагрузок по шинам оптимальная точность регулирования уровня напряжения всей энергосистемы является одновременно рациональной для любого распределительного устройства, что обеспечивает минимальный вес питательной сети.

2. Для каждого типа л. а. существует оптимальная величина точности регулирования уровня напряжения, обеспечивающая все потребители электроэнергией удовлетворительного качества при минимальном весе питательной сети.

3. Применение регуляторов напряжения с точностью регулирования выше оптимальной усложняет конструкцию регуляторов напряжения и снижает надежность энергоснабжения.

4. Вес питательной сети увеличивается не плавно, а скачкообразно за счет больших интервалов в шкале сечений проводов.

5. Медные провода сечением более 10 мм^2 применять нецелесообразно по весовым соображениям. Следует применять алюминиевые провода.

6. При расчете питательной сети необходимо учитывать возможность отказа линий питания распределительных устройств. Для шин, питающих ответственные потребители, напряжение не

должно снижаться ниже допустимой величины при выходе из строя одного канала.

Определив максимальные токовые нагрузки распределительных устройств, можно рассчитать их максимально допустимую удаленность и максимально допустимые моменты тока при различных точностях регулирования уровня напряжения.

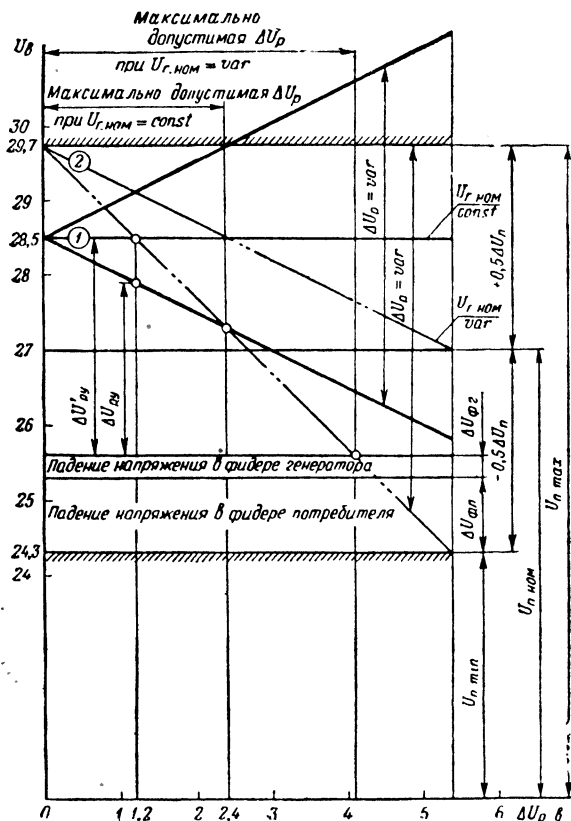


Рис. 3. 4. График допустимых потерь напряжения в питательной сети в зависимости от закона и точности регулирования напряжения

На рис. 3. 4 представлен график допустимых потерь напряжения в питательной сети в зависимости от точности регулирования при двух законах: с постоянным 1 и «плавающим» 2 номиналом.

В настоящее время номинальное напряжение, поддерживаемое регуляторами напряжения, принято равным $U_{г.ном} = 28,5$ в с законом регулирования

$$U_{г} = U_{г.ном} \pm 0,5 \Delta U_D \quad . \quad (3.5)$$

Факторами, определяющими применение регуляторов напряжения при таком законе регулирования, являются величины максимального и минимального напряжений. Применять регуляторы напряжения, допускающие $U_{Г\max} > 29,7$ в, достаточно опасно, так как при одиночном включении потребителя он может выйти из строя из-за повышенного напряжения в бортовой сети. Низкое минимальное напряжение заставляет прокладывать провода больших сечений, приводя к значительному утяжелению питающей сети. Современные тяжелые л. а. с удаленностью распределительных устройств на 30—35 м и моментами тока $20\,000 \div 22\,000$ а. м требуют для создания энергосистем постоянного тока минимального веса точности регулирования уровня напряжения $\Delta U_p \approx 1$ в.

Рассмотрим другой метод регулирования — метод «плавающего» номинального напряжения, по которому номинальное напряжение непостоянно, а изменяется в зависимости от точности регулирования уровня напряжения. При этом верхний предел напряжения остается неизменным, равным 29,7 в при любой точности регулирования напряжения. В этом случае

$$U_{Г\min} = U_{Г\max} - \Delta U_p \quad (3.6)$$

При регулировании напряжения по методу «плавающего» номинала в пределах точности регулирования от 0 до 2,4 в ($\Delta U_p = 0 \div 2,4$ в) величина минимального напряжения генератора больше, чем при регулировании по методу постоянного номинала. При величине $\Delta U_p = 1,2$ в метод «плавающего» номинального напряжения позволяет получить такое же снижение веса питающей сети, как и при $\Delta U_p = 0$ по методу постоянного номинала.

Как очевидно из графика рис. 3.4, с точки зрения минимального веса питающей сети целесообразнее регулирование напряжения по закону «плавающего» номинала в пределах $\Delta U_p = 0 \div 2,4$ в, в то время как при регулировании по закону постоянного номинала для получения того же эффекта требуется повышение точности. Передача таких моментов тока 20.000—22.000 а. м при использовании в регуляторах метода «плавающего» номинала может быть обеспечена регуляторами напряжения с точностью регулирования $\Delta U_p \approx 1,8$ в.

Оптимальная точность регулирования уровня напряжения бортовой сети определяется необходимой точностью регулирования какого-либо одного распределительного устройства и может в 1,5—2 раза превышать необходимую точность регулирования для других распределительных устройств. Это приводит к необходимости применять регуляторы напряжения с более высокой точностью регулирования.

При проектировании энергосистемы надо стремиться так распределить нагрузки между распределительными устройствами, чтобы они имели одинаковую величину необходимой точности регулирования. Если же точность регулирования заранее задана, то,

используя графики моментов тока и графики нагрузок распределительных устройств, надо так распределить между ними нагрузки, чтобы заданная точность регулирования была оптимальной для всех распределительных устройств л. а.

Так как расположение распределительных устройств определяется общей компоновкой л. а., то их удаленность является заранее заданной, поэтому для обеспечения минимального веса энергосистем постоянного тока, необходимо определять моменты тока распределительных устройств и по известной удаленности их получать допустимые токовые нагрузки при различных точностях регулирования уровня напряжения.

§ 5. РАСЧЕТ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Короткие замыкания проводов могут быть глухими или перемежающимися. В силовых цепях повреждения сопровождаются, как правило, глухими к. з., которые характеризуются нулевым значением сопротивления в точке короткого замыкания.

Поскольку к. з. является тяжелым видом повреждения электрической сети, то оно должно быть быстро изолировано от исправной части сети с помощью аппаратов защиты. Для правильного выбора защиты и коммутационной аппаратуры, способной в случае к. з. отключить неисправный участок сети, необходимо знать токи и напряжения отдельных участков сети при к. з. Знание величины токов к. з. необходимо также для определения динамических усилий и тепловых нагрузок элементов электроэнергетической системы.

Токи короткого замыкания рассчитываются графическим или графоаналитическим методом.

При графическом методе величины тока и напряжения при к. з. определяются графически по вольт-амперным характеристикам источников и потребителей электрической энергии.

На величину тока к. з. оказывает влияние ряд факторов: количество параллельно включенных источников и потребителей, характер их вольт-амперных характеристик, место и вид короткого замыкания, конфигурация питательной сети, переходные сопротивления в соединениях, защите, контактах и другой аппаратуре, учесть точное влияние которых практически невозможно. Поэтому результаты расчетов носят приближенный характер с точностью 10—15%. Этой точности достаточно для практического представления о порядке возможных величин токов к. з.

Более точные данные можно получить при испытании натуральных макетов энергетических систем в лабораторных условиях, однако и в этом случае процессы к. з. и их последствия будут отличаться от действительных.

При расчетах токов короткого замыкания в сетях постоянного тока рассматривается установившийся режим к. з., а вольт-амперные характеристики выбираются для генератора при максималь-

ной скорости вращения, для аккумулятора полностью заряженного (не менее 75%) и при номинальном токе нагрузки.

На рис. 3.5 представлена схема сети с одним генератором, внешняя характеристика генератора и графический метод расчета установившихся токов к. з. Предположим, что на некотором удалении от генератора в точке a имеет место к. з. с постоянным сопротивлением r_k , которое можно рассматривать как потребитель.

Если пренебречь сопротивлением линии от источника до точки a , то напряжение источника и потребителя r_k в рассматриваемой точке будут равны и, следовательно, величина тока и напря-

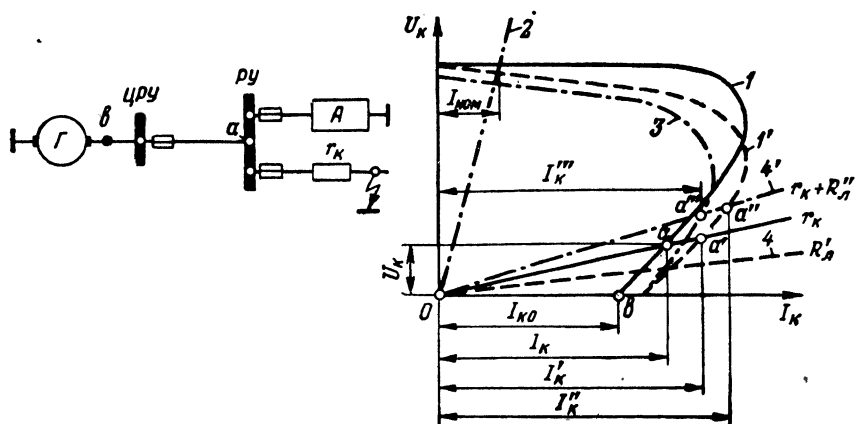


Рис. 3.5. Расчет установившегося тока короткого замыкания при питании от одного генератора с нагрузкой типа А

жения короткого замыкания в этой точке определяется абсциссой и ординатой точки пересечения внешней характеристики генератора (кривая 1) и луча сопротивления r_k .

Для учета падения напряжения в линии от генератора до точки a проводится луч сопротивления этой линии R'_l . Затем из внешней характеристики генератора графически вычитается прямая IR'_l и получается внешняя характеристика генератора, приведенная к точке a (кривая 1'), пересечение которой с лучом r_k дает ток к. з. I'_k (точка a').

Для учета падения напряжения в линии от сопротивления r_k до точки a , строится луч сопротивления этой линии R''_l , который складывается с лучом r_k и дает вольт-амперную характеристику потребителя с учетом падения напряжения в линии (луч 4'). Пересечение характеристик 1' и 4' (точка a'') дает ток к. з. I''_k .

Для учета влияния вольт-амперной характеристики нагрузки необходимо для каждого данного напряжения вычесть ток вольт-амперной характеристики нагрузки (луч 2) из тока внешней характеристики генератора (кривая 1'). Результирующая кривая 3 яв-

ляется приведенной вольт-амперной характеристикой генератора, пересечение которой с лучом $4'$ дает ток к. з. I_k''' .

При к. з. на зажимах генератора ($r_k=0$) ток короткого замыкания $I_{к0}$ не зависит от величины нагрузки R_{II} (точка $в$).

На рис. 3.6 представлен графический расчет установившегося тока к. з. при питании сети от двух генераторов и аккумулятора.

Сначала вольт-амперные характеристики источников приводятся к точке $в$. В этом случае учитываются падения напряжения в соответствующих фидерах.

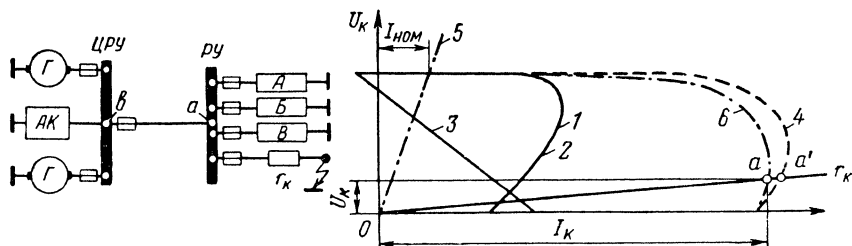


Рис. 3.6. Расчет установившегося тока короткого замыкания при питании от двух генераторов и аккумулятора с потребителями типа А, Б и В

Кривые 1, 2 и 3 являются приведенными к точке $в$ вольт-амперными характеристиками генераторов и аккумулятора.

Получившиеся вольт-амперные характеристики складывают. Результирующая вольт-амперная характеристика приводится к точке $а$ с учетом сопротивления линии (кривая 4).

Кривая 5 является суммарной вольт-амперной характеристикой нагрузок А, Б и В.

Графическое вычитание характеристик 5 и 4 дает приведенную к точке $а$ вольт-амперную характеристику (кривая 6) источников с учетом нагрузки.

Величина установившегося тока короткого замыкания определяется пересечением кривой 6 и луча r_k в точке $а$.

Из рассмотренного очевидно, что при прочих равных условиях токи к. з. при наличии подключенных потребителей меньше, чем при их отсутствии. В полете трудно предвидеть, какие потребители окажутся включенными в момент к. з., поэтому при практических расчетах влиянием потребителей на величину токов к. з. пренебрегают. В этом случае величины токов к. з. получаются несколько завышенными.

РАЗДЕЛ ЧЕТВЕРТЫЙ

ПЕРВИЧНЫЕ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Глава I

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭНЕРГОСИСТЕМАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА

§ 1. РОЛЬ ПЕРВИЧНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Первичные энергетические системы постоянного тока напряжением 27 в получили широкое распространение и на ряде типов летательных аппаратов являются основными системами электро-снабжения, обеспечивающими питание потребителей в нормальных и аварийных режимах полета. Система наиболее целесообразна, если потребляемая мощность электрической энергии не превышает 9—12 квт на двигатель, а двигатели запускаются стартер-генераторами.

В качестве основных источников энергии применяются генераторы постоянного тока, суммарная мощность которых выбирается из расчета обеспечения резерва от 50 до 100% по отношению суммарной мощности длительно работающих потребителей.

За номинальное напряжение генераторов принимается $28,5 \text{ в} \pm 3\%$ при обычном регулировании и $\pm 2\%$ в при точном регулировании напряжения, а за номинальное напряжение потребителей $27 \text{ в} \pm 10\%$.

Параллельно с генераторами включаются аккумуляторные батареи, которые являются резервным источником энергии для питания жизненно важных потребителей, необходимых для посадки или определенного времени полета при отказе всех генераторов.

§ 2. ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ЭНЕРГОСИСТЕМАМ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Технические требования к системам электроснабжения и электрическим сетям полностью распространяются на энергосистемы постоянного тока.

В технических требованиях должны найти отражение следующие основные вопросы:

- назначение, режимы работы, состав аппаратуры, основные параметры (мощность, напряжение и пульсации), качество энергии (допустимые отклонения напряжения от номинального значения);

- системы возбуждения, регулирования напряжения, управления, защиты, контроля и сигнализации;

- допустимые неравномерности нагрузки генераторов при параллельной работе, допустимые загрузки генераторов на земле без продува и перегрузки в полете в течение 5 мин и 5 сек;

- безотказность, живучесть, автономность, удобство и безопасность обслуживания, минимальный вес и габариты;

- высокая механическая, электрическая и термическая прочности, химическая стойкость, пожаро- и взрывобезопасность;

- быстроедействие, отсутствие помех радиооборудованию и магнитным приборам, простота, взаимозаменяемость и достаточный срок службы.

Отметим некоторые мероприятия и пути реализации перечисленных требований:

1. Параллельная работа всех источников на главную питательную сеть.

2. Автоматическое подключение источников энергии к питательной сети при выходе их на эксплуатационный режим.

3. Автоматическое отключение источников энергии от питательной сети при снижении выходного напряжения ниже допустимого.

4. Минимальное рассогласование нагрузок между параллельно работающими генераторами (не более 5—10% от номинальной мощности одного генератора).

5. Устойчивая параллельная работа генераторов при увеличении нагрузки от нуля до номинальной и сбросе нагрузки от номинальной до нуля (3—5% от номинальной).

6. Автоматическое и селективное отключение источника энергии от питательной сети при выходе его из строя.

7. Автоматическое и селективное отключение источника энергии от питательной сети при коротком замыкании на участке «источник—питательная сеть» и при перегрузках.

8. Автоматическое отключение перевозбужденного генератора от сети, так как при обрыве рабочей обмотки регулятора напряжения генератора повышается до 50 в.

9. Сохранение работоспособности питательной сети при выходе из строя отдельных источников энергии до тех пор, пока существует хотя бы один из них.

10. Максимальная надежность уравнивающей цепи, так как ее обрыв нарушает нормальное распределение нагрузки между генераторами.

11. Электрические цепи регулирования, управления и контроля должны иметь селективную защиту, обеспечивающую при коротком замыкании отключение поврежденной линии и сохранение живучести остальной сети.

§ 3. ОХЛАЖДЕНИЕ ГЕНЕРАТОРОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

В обычных генераторах постоянного тока, работающих до высоты 18 км в условиях дозвукового полета ($M=1,3$), применяется принудительное охлаждение (продув) встречным потоком воздуха, который поступает в генератор под действием динамического напора.

Генератор, рассчитанный на принудительное охлаждение, при работе без продува (в наземных условиях), снижает свою удельную мощность в 3—5 раз.

Увеличение высоты полета свыше 18 км вызывает снижение мощности генератора из-за уменьшения плотности и весового расхода воздуха через машину и коэффициентов теплоотдачи ее активных частей. Даже небольшое увеличение высотности ведет к значительному увеличению веса генератора и системы охлаждения (в 1,5 раза при увеличении высоты с 17 до 21 км).

Увеличение скорости полета приводит к уменьшению мощности обычного генератора из-за повышения температуры охлаждающего воздуха вследствие его торможения (аэродинамического нагрева). Аэродинамический нагрев воздуха незначителен при дозвуковых скоростях полета и резко увеличивается при превышении «звукового барьера», достигая при скорости полета $V_{\pi}=3000$ км/час примерно 250°С.

Сверхзвуковая скорость полета обуславливает большие затраты мощности авиадвигателя на продув воздуха через генератор. При $V_{\pi}=3000$ км/час эти потери в несколько раз превышают номинальную мощность машины.

Границей целесообразного увеличения расхода воздуха является так называемое воздушное «насыщение» машины, после чего с ростом расхода воздуха нагрузку нельзя увеличивать. Повышение температуры активных частей машины за пределом воздушного «насыщения» происходит примерно по линейному закону в зависимости от температуры входящего воздуха.

В связи с этим возникла необходимость применения новых принципов охлаждения и конструирования авиационных электрических машин.

На больших высотах в сверхзвуковых летательных аппаратах получили распространение генераторы постоянного тока с испарительным охлаждением.

Конструктивные схемы генераторов с воздушно-испарительным охлаждением мало отличаются от схем с обычным воздушным охлаждением. Роль воздуха сведена к транспортировке жидкости

в машину в дисперсном состоянии. Распыляется жидкость в зоне активных частей.

Активные части генераторов охлаждаются путем испарения на них тончайших пленок жидкости. Образование пленок основано на принципе центробежного распыления жидкости. В зависимости от скорости вращения перераспределение жидкости между якорем и поверхностью коллектора достигается с помощью конусного распылителя.

Интенсивность пленочного охлаждения выше интенсивности воздушного охлаждения, что дает возможность уменьшить габариты и вес машин до 30%.

Наибольший интерес представляют универсальные системы охлаждения, в которых в зависимости от условий полета система охлаждения переключается с воздушной на воздушно-испарительную или чисто испарительную.

Автоматический переход с одной системы охлаждения на другую позволяет обеспечить наибольшую эффективность использования электрической машины на летательном аппарате с большим диапазоном скоростей и высот.

Глава II

ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

§ 1. АВИАЦИОННЫЕ АККУМУЛЯТОРЫ

Аккумуляторы представляют собой гальванические элементы, в которых легко обращаются электрохимические процессы, т. е. элементы могут *отдавать* электроэнергию во внешнюю цепь или *накапливать* (аккумулировать) ее, если она подводится от постороннего источника тока.

Аккумуляторы, устанавливаемые на л. а., работают параллельно с генераторами на общую сеть и предназначены для:

- покрытия пиков тока, превышающих максимально допустимую нагрузку генераторов, при запуске и кратковременной работе мощных потребителей в полете;

- питания жизненно важных потребителей в полете при выходе из строя генераторов;

- питания потребителей при рулении по аэродрому с отключенными генераторами;

- питания стартеров при автономном запуске авиадвигателей или энергоузлов;

- питания маломощных потребителей на стоянках при проведении предполетного и послеполетного осмотра в случае отсутствия аэродромных источников энергии.

Аккумуляторы имеют условные обозначения в виде цифр и букв, служащих для указания числа элементов, номинальной разряд-

ной емкости ($a, ч$) и типа аккумулятора. Цифры указывают: первые — число элементов в батарее, вторые — номинальную емкость батареи при разряде в течение 10 или 5 час.

На летательных аппаратах нашли применение несколько типов аккумуляторов: кислотные (свинцовые) типа 12-А-30, 12-САМ-28, 12-САМ-53; щелочные (серебряноцинковые) типа 15-СЦС-45; щелочные (кадмиевоникелевые) типа 20-КНБ-30.

Аккумуляторы должны нормально работать при всех скоростях полета, различных эволюциях и положениях летательного аппарата в пространстве, изменении окружающей температуры от $+50$ до -60°C (с принятием мер для их охлаждения или утепления) и атмосферного давления до 25 мм рт. ст. Э. д. с. аккумулятора зависит от плотности и температуры электролита и с достаточным приближением определяется уравнением

$$E_a = 12(0,84 + d) \text{ в},$$

где d — плотность электролита при 15°C в $г/см^3$.

Внутреннее сопротивление аккумулятора уменьшается во время заряда и увеличивается при разряде особенно большими токами. Оно весьма мало — составляет сотые или даже тысячные доли ома, что позволяет получить большие токи при сравнительно малых потерях внутри аккумулятора.

Напряжение аккумулятора отличается от э. д. с. на величину падения напряжения во внутренней цепи аккумулятора:

$$\text{при заряде } U_z = E_a + I_a R_a;$$

$$\text{при разряде } U_p = E_a - I_a R_a,$$

где I_a — ток, протекающий через аккумулятор при заряде или разряде;

R_a — внутреннее сопротивление аккумулятора.

На рис. 2.1 показаны типичные кривые изменения напряжения аккумулятора по времени при заряде и разряде его током 10-часового режима, который для большинства аккумуляторов принимается за номинальный.

В полностью заряженных аккумуляторах при плотности электролита $1,285 \text{ г/см}^3$ э. д. с. батареи равна $25,5\text{—}26,0 \text{ в}$.

Практически разряд аккумулятора можно вести только до определенного конечного напряжения, разряд ниже которого приводит к порче аккумулятора. Правилами эксплуатации для больших разрядных токов допускаются меньшие конечные напряжения.

Температура электролита оказывает существенное влияние на напряжение во время разряда и заряда аккумуляторов.

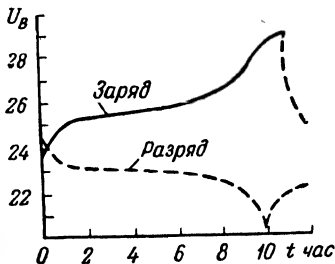


Рис. 2.1. Изменение напряжения аккумулятора при заряде и разряде

При понижении температуры вязкость электролита и внутреннее сопротивление возрастают, выравнивание плотности замедляется, и падение напряжения при прохождении тока увеличивается. Напряжение на зажимах аккумулятора для одного и того же разрядного тока с понижением температуры снижается с большей крутизной (рис. 2.2).

При замерзании электролита э.д.с. аккумулятора практически равна нулю. Заряд при пониженной температуре требует повышенного зарядного напряжения.

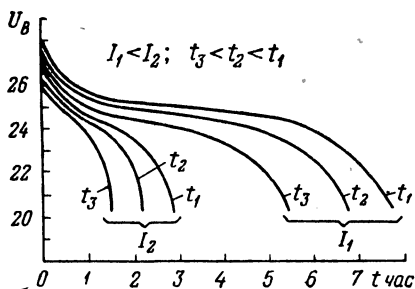


Рис. 2.2. Изменение напряжения аккумулятора при разрядке в условиях различных температур и токов

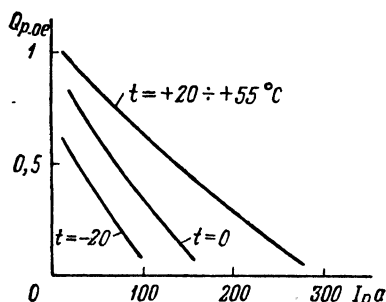


Рис. 2.3. Зависимость емкости аккумулятора от разрядного тока при различных температурах

Емкость аккумулятора определяется количеством электричества, которое он отдает при разряде до наименьшего допустимого напряжения:

$$Q_p = \int_0^t i_p dt.$$

Если разряд происходит при постоянной силе тока, то

$$Q_p = I_p t_p,$$

где t_p — время разряда.

За номинальную емкость принимается емкость при 10-часовом разряде до напряжения на зажимах аккумулятора 20,4 в (при начальной плотности электролита 1,285 г/см³ и температуре +20°С).

Емкость зависит от ряда факторов: количества и пористости активного вещества, толщины и площади пластин, температуры и плотности электролита, атмосферного давления, величины разрядного тока и предшествующего состояния аккумулятора.

Большое влияние на емкость аккумуляторов оказывает режим разряда. Как видно из рис. 2.3, с увеличением разрядного тока емкость аккумуляторов резко снижается.

При разряде токами, большими номинальных, емкость можно приближенно определить по формуле

$$Q_p = 0,4Q_{\text{ном}} \lg \frac{I_{a \max}}{I_p},$$

где $I_{a \max}$ — ток короткого замыкания аккумулятора;
 I_p — разрядный ток аккумулятора, при котором определяется Q_p .

На величину емкости аккумулятора значительное влияние оказывает также температура электролита. С понижением температуры емкость падает.

Емкость аккумулятора при пониженной температуре определяется по формуле

$$Q_v = Q_{20}[1 + 0,01(v - 20^\circ)],$$

где Q_v — емкость при температуре v ;
 Q_{20} — емкость при температуре $+20^\circ \text{C}$.

$$v = v_k + (v_n - v_k) e^{-\frac{t}{T_{\text{конг}}}},$$

где v_k — температура окружающей среды;
 v_n — начальная температура электролита;
 $T_{\text{конг}}$ — постоянная времени аккумулятора с контейнером;
 t — время полета.

Аккумуляторы на летательных аппаратах устанавливают в специальных контейнерах, уменьшающих теплоотдачу и предохраняющих от механических повреждений и проникновения масла, воды и других веществ.

Контейнеры в большинстве случаев выполняются из дуралюмина с теплоизолирующей кислотоупорной прокладкой из оленьего войлока или твердого анозола. Толщина теплоизоляционного слоя обычно не превышает 15—20 мм. Температура электролита не должна быть ниже -5°C . При продолжительных полетах в условиях низких температур теплоизоляция не приносит должного эффекта и приходится применять обогрев аккумулятора.

Основные технические данные аккумуляторных батарей приведены в табл. 2.1.

Принципиальная схема фидера аккумуляторов и розеток аэродромного питания, представленная на рис. 2.4, обеспечивает решение следующих задач:

1. Подключение аккумуляторов 101 и 102 к шинам бортсети 41А и 42Б с помощью контакторов 103 и 104 и выключателей 107 и 108. Последний используется при аварийной ситуации.

2. Предотвращение подключения аккумуляторов к бортсети при неправильной полярности. При этом полупроводник открывает реле 105 (106), последнее срабатывает и цепь питания контактора 103 (104) разрывается.

Основные технические данные аккумуляторных батарей

Тип аккумулятора	Номинальное напряжение в	Режим основного разряда				Вес кг	Относительный вес кг/а.ч	Высота мм	Температура °С
		время час	ток разряда а	емкость а.час	конечное напряжение на элементе, в				
12-А-10	24	10	1,0	10	1,7	14,5	1,45	15	+50÷-50
12-А-30	24	10	3,0	26	1,7	27,8	1,07	15	+50÷-50
12-АО-50	24	10	4,8	48	1,7	54,0	1,12	15	+50÷-50
12-САМ-28	24	5	5,6	28	1,7	28,5	1,02	17	+50÷-50
12-САМ-55	24	5	11	55	1,7	55,0	1,00	18	+50÷-50
15-СЦС-45	27	5	9	45	1,6	14,3	0,32	20	
12-АСАМ-23	24		5	21	1,8	30,0	1,42	35	+50÷-50
20-КБН-30	24	3	10	30	1,0	36,0	1,2	36	+50÷-5

3. Поочередный контроль тока аккумуляторов с помощью амперметра 109 и переключателя 110.

4. Автоматическое переключение аккумуляторов контакторами 113, 114 и 115 по сигналам системы запуска на напряжение 48 в для питания электростартера. При этом бортсеть получает напряжение 24 в.

5. Пп. 1, 2, 3 и 4 полностью распространяются на процесс подключения к бортсети розеток аэродромного питания 117 и 118. Для этой цели переключатель 107 устанавливается в положение «РАП».

6. Снижение возможности подгара силовых контактов розетки 117 (118) в момент подсоединения ее наземной части к бортовой. Это обеспечивается большей длиной силовых штырей по сравнению с управляющими.

7. Автоматическое отключение бортовых генераторов от сети с помощью реле 123 (124) и включение сигнальной лампы 125 (126) при включении любой розетки.

8. Исключает возможность запуска авиадвигателя при подключении только одной розетки аэродромного питания. Это выполняется за счет последовательного прохода цепи управления запуском через нормально-разомкнутые контакты реле 123 и 124.

Если не требуется переключать систему с 24 на 48 в, то контакторы 113, 114 и 115 не устанавливаются и схема соответственно упрощается.

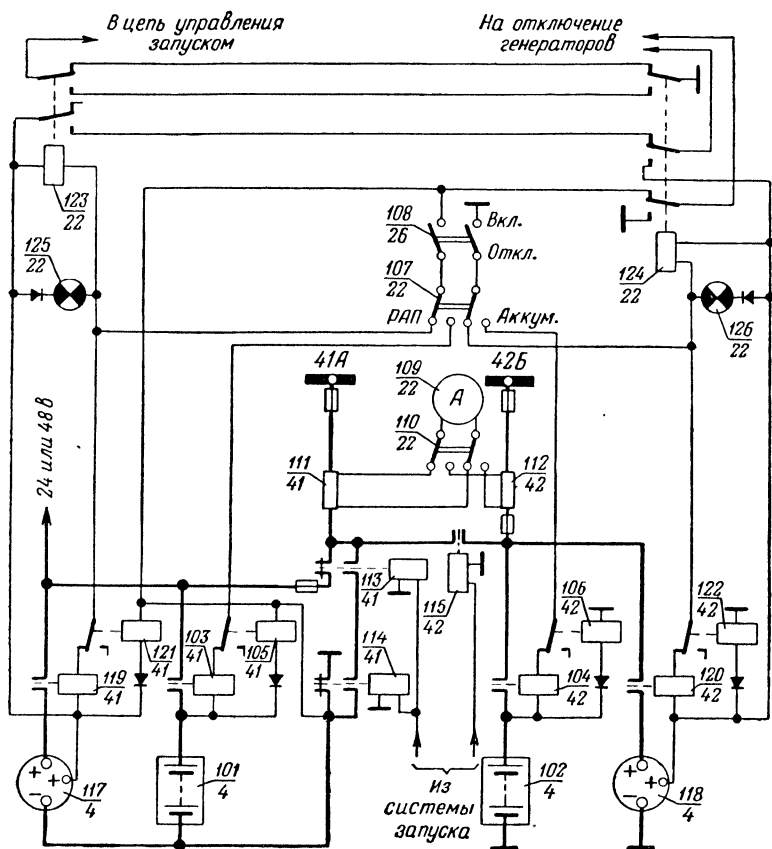


Рис. 2.4. Схема управления и защиты фидера аккумуляторов и розеток аэродромного питания

§ 2. ГЕНЕРАТОРЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

На летательных аппаратах получили распространение генераторы серии ГС и ГСР мощностью 3—18 кВт и напряжением 28,5 в с принудительным охлаждением. Эти генераторы характеризуются достаточной надежностью, компактностью, высотностью (до 20 км и более), быстроходностью ($n=3800 \div 9000$ об/мин), малым относительным весом (3,7—2 кг/кВт) и высоким к. п. д. (0,75÷0,78).

Вес генератора постоянного тока напряжением 30 в определяется по имперической формуле [1]:

$$G = 14 \left(\frac{P_{\text{НОМ}}}{p_{\text{НАЧ}}} \right)^{0,67} \text{ кг.}$$

Из формулы очевидно, что повышение начальной скорости вращения $n_{\text{нач}}$ позволяет резко снизить вес генератора или повысить его номинальную мощность и улучшить эксплуатационные характеристики. Так, у генераторов, работающих при постоянной скорости вращения, значительно снижается мощность возбуждения и размеры аппаратуры и повышается точность регулирования напряжения за зоной изменения тока возбуждения.

Основные технические данные генераторов постоянного тока приведены в табл. 2.2.

Работа генератора определяется внешней характеристикой (рис. 2.5), представляющей собой зависимость напряжения на зажимах генератора от токов нагрузки при неизменном сопротивлении цепи возбуждения и постоянной скорости вращения.

У генератора, работающего без регулятора напряжения (характеристика показана пунктиром), при увеличении нагрузки напряжение снижается из-за падений напряжения в якорной обмотке и в щеточном контакте, реакции якоря и уменьшения тока возбуждения.

При неизменном сопротивлении цепи возбуждения с увеличением скорости вращения внешняя характеристика располагается выше, а величина критического тока ($I_{кр}$) возрастает.

Величина установившегося тока короткого замыкания ($I_{к.з}$) определяется величиной магнитного потока остаточного магнетизма и скоростью вращения и обычно меньше номинального ($I_{ном}$). Авиационные генераторы работают с автоматическими регуляторами напряжения. Регулятор напряжения, начиная с холостого хода и до предельной нагрузки $I_{пред}$ (которая выше номинальной), поддерживает напряжение практически неизменным.

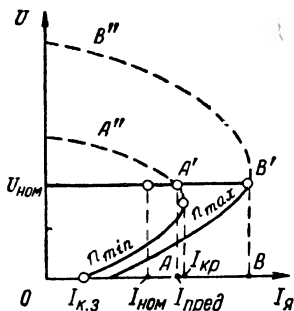


Рис. 2.5. Внешняя характеристика генератора с параллельным возбуждением, работающего с регулятором напряжения

Предельный ток (перегрузочная способность), который можно получить от генератора при номинальном напряжении увеличивается с возрастанием скорости вращения и достигает наибольшей величины при максимальной скорости (отрезок *ОВ*).

Предельный и критический токи выбираются при минимально допустимых скоростях вращения и принимаются равными:

$$I_{\text{пред}} \approx 1,8I_{\text{ном}}; I_{\text{кр}} = 2I_{\text{ном}}.$$

Они могут быть увеличены за счет применения компенсационной обмотки, компенсирующей действие реакции якоря.

§ 3. БЕСКОНТАКТНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

При сверхзвуковых скоростных полетах и на высотах больше 18 км охлаждать генератор обычного типа затруднительно главным образом из-за наличия коллектора и щеток. Несмотря на ряд конструктивных мер и применение специальных материалов коллекторно-щеточный узел остается самым ненадежным элементом генератора постоянного тока в этих условиях полета.

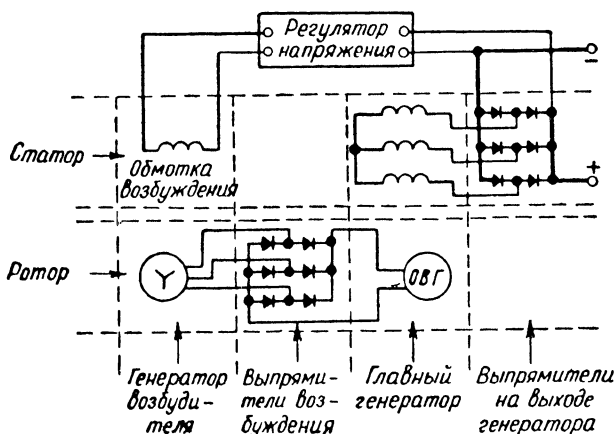


Рис. 2. 6. Схема бесконтактного генератора постоянного тока

С развитием полупроводниковой техники появились мощные кремниевые диоды, которые дают возможность создать бесконтактные генераторы постоянного тока.

Бесконтактный генератор (рис. 2. 6) включает четыре основных элемента: возбудитель переменного тока, выпрямители возбуждения главного генератора, главный генератор и выпрямители на выходе главного генератора.

Основные технические данные

Тип генератора	Номинальные данные				Вес G , кг	Относительный вес $G/P_{ном}$, кг/квт	Высота H , мм	Расход и давление воздуха, $дм^3/сек$ и $мм вод. ст.$	Габариты	
	мощность $P_{ном}^{**}$, квт	напряжение U , в	сила тока I , а	скорость n , об/мин. 103					диаметр, мм	длина, мм
ГСР-3000	3,0	28,5	100	4,0—9,0	11,5	3,84	15	40/	146	245
ГСР-6000	6,0	28,5	200	4,0—9,0	20,9	3,48	18	70/260	166	348
ГСР-9000	9,0	28,5	300	4,0—9,0	24,0	2,67	15	95/260	166	386
ГСР-СТ-9000*	9,0	28,5	300	4,0—9,0	28,0	3,11	20	75/300	186	306
ГСР-12000	12,0	28,5	400	4,0—9,0	28,6	2,38	15	160/400		
ГСР-СТ-12000*	12,0	28,5	400	4,0—9,0	31,0	2,58	18	145/360	179	436
ГС-12	12,0	28,5	400	4,2—9,0	33,0	2,75	15	160/400	196	382
СТГ-12В*	12,0	28,5	400	4,2—9,0	31,5	2,63	15	160/400	199	362
ГСР-18000	18,0	28,5	600	4,0—9,0	41,5	2,3	15	225/400	198	479
ГСР-СТ-18000*	18,0	28,5	600	4,0—9,0	43,0	2,39	15	225/400	198	427
ГС-18	18,0	28,5	600	4,2—9,0	40	2,22	15	160/400	205	448
СТГ-18*	18,0	28,5	600	4,2—9,0	46	2,55	15	180/400	205	495

* Стартер-генератор.

** Мощность дана при $U=30$ в.

генераторов постоянного тока

Число полюсов		Регулирующая аппаратура						
основных	дополнительных	минимальные реле	регулятор напряжения	точное регулирование напряжения	защита от перенапряжения	стабилизирующий трансформатор	выносное сопротивление	минусовое сопротивление
		ДМР-400Д	Р-25АМ			ТС-9АМ	ВС-25Б	РС-7
		ДМР-400Д	Р-25АМ			ТС-9АМ	ВС-25Б	БС-6000
6	3	ДМР-400Д	Р-25АМ РУГ-50	ДКН-2		ТС-9АМ	ВС-25Б	РС-2
		ДМР-400АМ	Р-27 РУГ-50	ДКН-2		ТС-9АМ	ВС-25Б	РС-2
8	4	ДМР-400Т	РУГ-50 Р-25АМ РУГ-82	ДКН-2		ТС-9АМ	ВС-25Б	БС-12000
		ДМР-400А	РУГ-82 РУГ-83	ДКН-2		ТС-9АМ-12	ВС-20Б	БС-12000
		ДМР-400Т	РН-180					БС-12000
6	6	ДМР-400Т	РН-180Б Р11К-180Б	ЦКН-8Д	АЗП-Ц		ВС-20	БС-12000
8	4	ДМР-600Т	РУГ-82 РУГ-83	ДКН-2		ТС-9М		БС-18000
		ДМР-600Т	РУГ-82 РУГ-83	ДКН-2		ТС-9АМ	ВС-20	БС-18000
6		ДМР-600Т	РНК-180Б	ЦКН-8Д	АЗП-Ц		ВС-20	
6		ДМР-600Т						

Выход с рабочей обмотки возбуждателя переменного тока подается через выпрямители возбуждения на обмотку возбуждения главного генератора. Все эти элементы смонтированы на вращающемся роторе, что исключает необходимость применения между ними скользящих контактов (коллектора и щеток).

Напряжение с рабочих обмоток главного генератора подается на выходные выпрямители, с которых выпрямленный ток поступает в питательную сеть и одновременно через регулятор напряжения на обмотку возбуждения возбуждателя. Указанные элементы расположены в статоре и для связи между собой не требуют применения скользящих контактов.

Возбудитель является усилителем большой мощности и работает при незначительном токе возбуждения в сравнении с током возбуждения главного генератора. Это позволяет применять для возбуждателя автоматический регулятор напряжения малой мощности, что приводит к уменьшению его размеров, веса и количества отводимого тепла.

Бесконтактные генераторы постоянного тока со статическими регуляторами напряжения дают возможность применить постоянный ток для различных типов сверхзвуковых и высотных летательных аппаратов, если он необходим для питания основных потребителей.

Вес генератора, приходящийся на единицу мощности, составляет около 2 кг/квт .

Глава III

РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ И ЗАЩИТА ГЕНЕРАТОРОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

§ 1. РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ГЕНЕРАТОРОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Напряжение генераторов при всех режимах эксплуатации, т. е. при переменной скорости вращения и изменении нагрузки от 0 до предельной ($I_{\text{пред}} \approx 2I_{\text{ном}}$) практически должно поддерживаться постоянным. Эту задачу выполняют автоматические регуляторы напряжения, которые, изменяя сопротивление цепи возбуждения, воздействуют на величину тока возбуждения генераторов и тем самым поддерживают неизменным их напряжение и равномерное распределение нагрузки при параллельной работе генераторов.

Для автоматического регулирования напряжения генераторов с токами возбуждения более 2 а применяются угольные регуляторы напряжения серий Р, РУГ и РН, плавно изменяющие сопротивление в цепи возбуждения.

Эти регуляторы имеют одну и ту же конструктивную схему (рис. 3.1) и отличаются размерами деталей, выполнением отдель-

ных узлов, некоторыми элементами электрической схемы и значениями параметров.

Регулятор имеет два основных элемента: угольный столб 1 и электромагнит, состоящий из сердечника 2, основной обмотки W_3 и уравнивающей обмотки W_4 . Угольный столб состоит из набора тонких угольных шайб, помещенных в керамическую трубку 3, которая укреплена в ребристом корпусе 4. С обеих сторон угольного столба имеются изолированные от корпуса угольные контакты 5, установленные в держателях 7. Последние передают давление на угольный столб и соединяют его с обмоткой возбуждения W_6 генератора. Давление на угольный столб зависит от действия механической пружины 9 и электромагнита. С помощью регулировочного винта 8 можно изменять давление пружины 9 на угольный столб, изменяя тем самым настройку регулятора. Сердечник 2 имеет резьбу, позволяющую регулировать воздушный зазор x электромагнита. Притяжению якоря 6 к сердечнику 2 противодействует пружина 9, на которой жестко закреплен якорь.

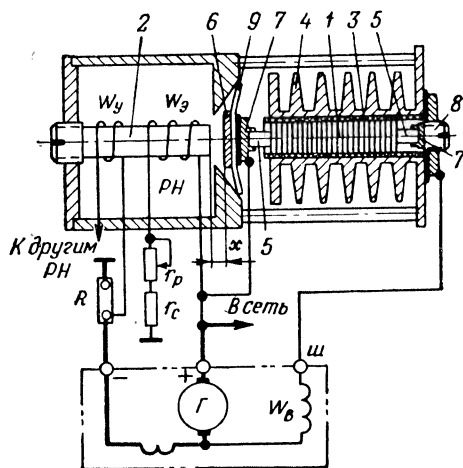


Рис. 3. 1. Конструктивная схема угольного регулятора напряжения:

1—угольный столб; 2—сердечник; 3—керамическая трубка; 4—ребристый корпус; 5—угольные контакты; 6—якорь; 7—держатели; 8—регулирующий винт; 9—пружина

Регулятор также имеет средства температурной компенсации — специальные сопротивления и обмотки для точного поддержания напряжения при различных температурных условиях и средства стабилизации для обеспечения устойчивой работы регулятора в переходных режимах. При работе регулятора давление на угольный столб может изменяться при помощи электромагнита, обмотка W_3 которого через регулируемое сопротивление r_p присоединена к зажимам генератора.

При увеличении напряжения генератора ток в обмотке W_3 возрастает, давление на столб уменьшается, сопротивление соответственно увеличивается, ток возбуждения уменьшается, чем и ограничивается повышение напряжения. При понижении напряжения процесс регулирования происходит в обратном порядке.

Настройка регулятора. В зависимости от характера и взаимного расположения электромагнитной и механической характеристик угольного регулятора регулирование напряжения может

быть статическим или астатическим. На рис. 3.2 показаны три возможных случая настройки регуляторов.

Случай А. Наклон электромагнитных характеристик $F_{эм}$ меньше наклона механической характеристики F_m . В положении равновесия, соответствующем пересечению электромагнитной и механической характеристик (точка 1) при зазоре $x=x_1$, регулируемое напряжение равно U_2 . При нарушении равновесия, например в результате сброса нагрузки, напряжение увеличивается и рабочая точка попадает на электромагнитную характеристику, соответствующую напряжению U_4 (точка 2). Вследствие увеличения на-

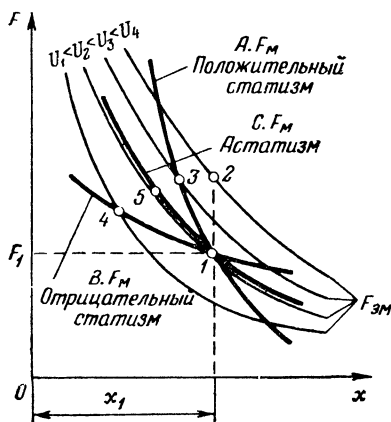


Рис. 3.2. Электромагнитные и механические характеристики регулятора при различных видах настройки

пряжения регулятор приходит в действие, воздушный зазор x уменьшается и рабочая точка перемещается влево, пока не попадет снова на механическую характеристику F_m (точка 3). Новому положению равновесия соответствует напряжение U_3 большее, чем напряжение U_2 . В рассматриваемом случае регулятор настроен так, что уменьшение нагрузки приводит к увеличению напряжения, и наоборот, т. е. характеристика будет падающей с нагрузкой. Такая настройка, получившая наибольшее применение в самолетных регуляторах, называется настройкой с *положительным статизмом*.

Случай В. Если наклон электромагнитной характеристики

больше наклона механической характеристики, то с уменьшением нагрузки регулируемое напряжение уменьшается $U_1 < U_2$ (точка 4). Это настройка с *отрицательным статизмом*.

Случай С. Если обеспечить точное согласование в рабочем диапазоне характеристики силы тяги электромагнита и механической характеристики, равной разности усилий пружины и упругой деформации угольного столба, то в конце процесса регулирования рабочая точка окажется на первоначальной характеристике, переместившись из точки 1 в точку 5, которая соответствует состоянию равновесия при новом режиме работы. Такая настройка регулятора напряжения называется *астатической*.

Точное совпадение электромагнитной и механической характеристик обычно получить трудно, поэтому все регуляторы имеют статизм, определяемый выбором рабочей точки на регулировочной характеристике (рис. 3.3). Рабочую точку выбирают при холостом ходе и средней скорости вращения генератора путем сжатия угольного столба при ввертывании регулировочного винта. В точке А

угольный столб разжат, ток возбуждения $I_b=0$, и напряжение создается генератором за счет остаточного магнетизма. На участке AB зазор между шайбами угольного столба устраняется и напряжение почти не возрастает. На участке BC напряжение быстро возрастает за счет сжатия шайб угольного столба, однако силы сжатия малы и не влияют на положение пружины. Магнитный зазор велик, а электромагнитные силы малы. На участке CD пружина слабо сжата и ее механическая характеристика находится ниже характеристики электромагнитной силы. Следовательно, при росте нагрузки регулятор имеет отрицательный статизм.

При ввертывании регулировочного винта увеличивается сжатие угольного столба, уменьшается магнитный зазор и как следствие — регулируемое напряжение.

За точкой C' регулятор обычно становится неустойчивым, так как пружина начинает вибрировать, вызывая резкое колебание напряжения генератора. Это объясняется тем, что пружина предварительно мало сжата и при всяком нарушении равновесия (сброс нагрузки и другие) электромагнитная сила может настолько сжать пружину, что происходит разрыв угольного столба. При этом ток возбуждения, напряжение и электромагнитная сила падают до нуля, после чего столб сжимается пружиной, напряжение возрастает и процесс «хлопков» повторяется. Режим «хлопков» очень опасен для регулятора и поэтому при ввертывании регулировочного винта эта зона $C'D'$ должна проходить быстро.

При дальнейшем перемещении винта в точке D вибрации пружины прекращаются и регулятор становится стабильным. Участок DE соответствует устойчивой работе регулятора.

В точке D механическая и электромагнитная характеристики совпадают. В этой точке регулятор настроен астатически и с изменением I и n регулируемое напряжение не изменяется.

На участке DE пружина сильно сжата и ее механические характеристики находятся выше характеристики электромагнитной силы. Следовательно, при росте нагрузки регулятор имеет положительный статизм регулирования напряжения.

При ввертывании регулировочного винта жесткость пружины увеличивается, механическая характеристика поднимается вверх и регулируемое напряжение возрастает.

Уровень напряжения регуляторов изменяется ввертыванием или вывертыванием сердечника электромагнита. При ввертывании сердечника напряжение понижается за счет уменьшения необходимой н. с. для создания той же электромагнитной силы тяги, и наоборот.

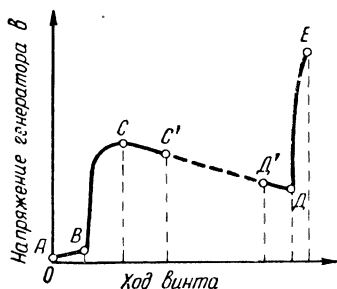


Рис. 3.3. Регулировочная характеристика регулятора

§ 2. СИСТЕМА ТОЧНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ И ЗАЩИТЫ ОТ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

Система состоит из комбинированных регуляторов напряжения, центрального корректора напряжения и автомата защиты от аварийного повышения напряжения и обеспечивает решение следующих задач:

1) поддержание напряжения с точностью $\pm 0,5$ в при изменении скорости вращения в пределах 4000—9000 об/мин и нагрузки от 0 до номинальной;

2) равномерное распределение нагрузки между параллельно работающими генераторами с точностью $\pm (5-10) \%$;

3) возможность подрегулирования распределения нагрузки с помощью выносных сопротивлений регуляторов напряжения;

4) возможность изменения уровня напряжения бортовой сети на $\pm 0,75$ в с помощью регулирующего сопротивления корректора;

5) ручное переключение с одного корректора на другой, если предусматривается установка дублирующего;

6) срабатывание автомата защиты при всех аварийных режимах, если напряжение на сборных шинах повышается сверх 34 в, при этом загорается сигнальная лампа «Перенапряжение»;

7) при внезапном повышении напряжения на сборных шинах время срабатывания защиты при 34 в не более 1—3,5 сек, а при 60 в не менее 0,04—0,1 сек.

Рассмотрим некоторые схемы, которые можно выбрать для решения отмеченных задач.

Схема КРН представлена на рис. 3.4.

Регулятор работает следующим образом. При повышении напряжения генератора увеличивается ток в обмотке W_a , возрастает действие электромагнита, давление на угольный столб уменьшается, а его сопротивление увеличивается, уменьшая ток возбуждения генератора и соответственно снижая его напряжение.

Параллельно рабочей обмотке включена обмотка температурной компенсации W_T , намагничивающая сила которой вычитается из намагничивающей силы обмотки W_a . На регулятор действует разность этих намагничивающих сил. Обмотки W_a и W_T и сопротивление температурной компенсации R подобраны таким образом, что приращение намагничивающих сил при изменении температуры обеих обмоток примерно одинаково.

Устойчивость работы регулятора достигается введением обратной связи с помощью сопротивлений и обмотки $W_{ст}$.

При замкнутом выключателе B_1 срабатывает реле P_2 и включает уравнительную обмотку W_y регулятора на общую для всех параллельно работающих генераторов уравнительную шину. Величина и направление тока в W_y зависит от разности потенциалов уравнительной шины и минусовой щетки генератора, с которым работает данный регулятор. Уравнительный ток, проходя по обмотке W_y , воздействует на регулятор, повышая напряжение недогруженного и снижая напряжение перегруженного генератора.

Корректирующая обмотка W_K с помощью реле P_2 включается параллельно аналогичным обмоткам регуляторов напряжения остальных генераторов и получает сигналы от центрального корректора напряжения.

Схема ЦКН — упрощенная схема центрального корректора напряжения представлена на рис. 3.5.

Чувствительным элементом ЦКН является мост, в одно из плеч которого включен кремниевый стабилитрон СТ. В диагональ моста

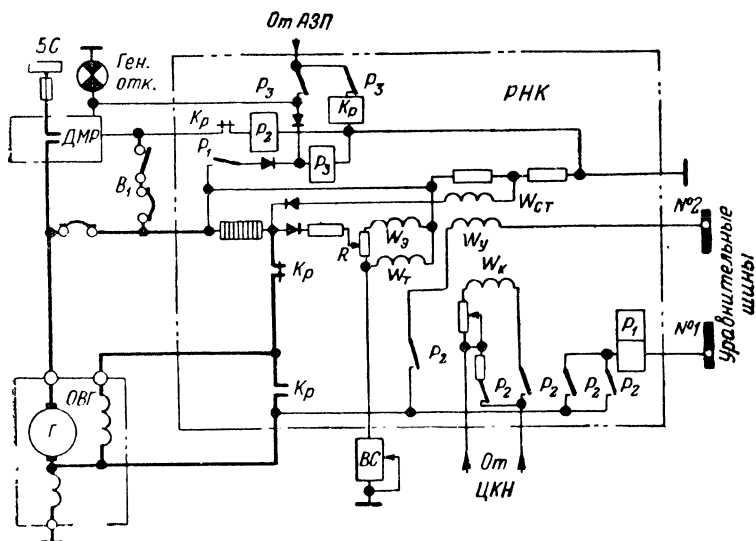


Рис. 3.4. Схема комбинированного регулятора напряжения (КРН):

W_9 — рабочая обмотка; W_y — обмотка параллельной работы; W_K — корректирующая обмотка; W_{CT} — стабилизирующая обмотка; W_T — температурная компенсация

включена обмотка поляризованного реле P . При номинальном напряжении бортовой сети якорек реле занимает нейтральное положение.

При уменьшении напряжения на сборных шинах якорек переходит в положение Л и конденсатор C заряжается. Увеличивается потенциал сетки лампы Л, растет анодный ток, понижается потенциал базы и сопротивление триода T , что приводит к рассогласованию выходного моста, состоящего из R_6 , R_7 , R_8 и T , и соответственно к увеличению тока в корректирующей обмотке W_K регулятора. Обмотка W_K включена встречно W_9 ; суммарные ампер-витки уменьшаются и напряжение на шинах увеличивается. Как только напряжение достигает номинальной величины, якорек переходит в нейтральное положение и остается в нем.

При увеличении напряжения на сборных шинах якорек переходит в положение П конденсатор C начинает разряжаться через сопротивление R_5 . При этом потенциал сетки и анодный ток лампы

будут снижаться, потенциал базы триода увеличиваться, ток в W_n и напряжение на шинах уменьшаться. Когда напряжение достигает номинальной величины, якореk переходит в нейтральное положение. Таким образом, ЦКН работает как вибрационный регулятор напряжения, причем частота вибрации контактов определяется емкостью конденсатора C и сопротивлениями R_4 и R_5 . Схему корректора напряжения можно настроить так, чтобы при переходе напряжения генератора через номинальное значение изменялся знак тока в корректирующей обмотке.

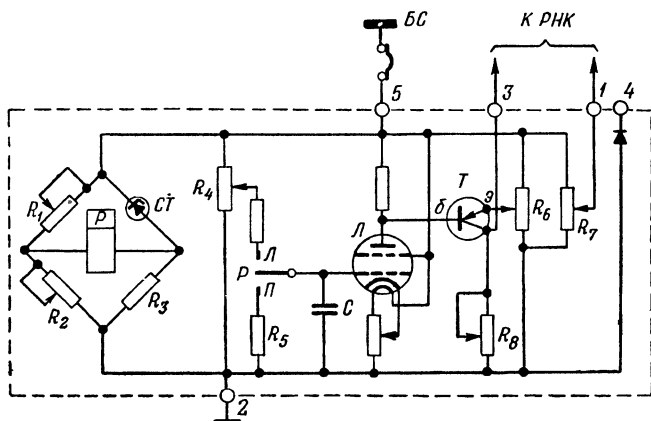


Рис. 3.5. Схема центрального корректора напряжения (ЦКН)

ЦКН является астатическим регулятором, так как якореk может занимать нейтральное положение при любом токе корректирующих обмоток.

Обычно чувствительный орган ЦКН — зажимы 5 и 2 — подключаются к такой точке электрической сети, напряжение в которой желательно поддерживать постоянным, а выходные зажимы 1 и 3 соединяются с корректирующими обмотками W_n регуляторов напряжения.

Схема АЗП показана на рис. 3.6. Схема защиты сети от аварийного повышения напряжения состоит из центрального автомата защиты АЗП и ряда элементов, входящих в каждый регулятор напряжения. Автомат защиты измеряет общий уровень напряжения на сборных шинах, а элементы защиты осуществляют селективность.

АЗП имеет два одинаковых чувствительных органа — две мостовые схемы, в диагональ которых включены поляризованные реле P_{10} и P_{11} . Мостовые схемы имеют различную настройку: реле P_{10} срабатывает при напряжении 30—31 в, а реле P_{11} — при напряжении более 33—34 в.

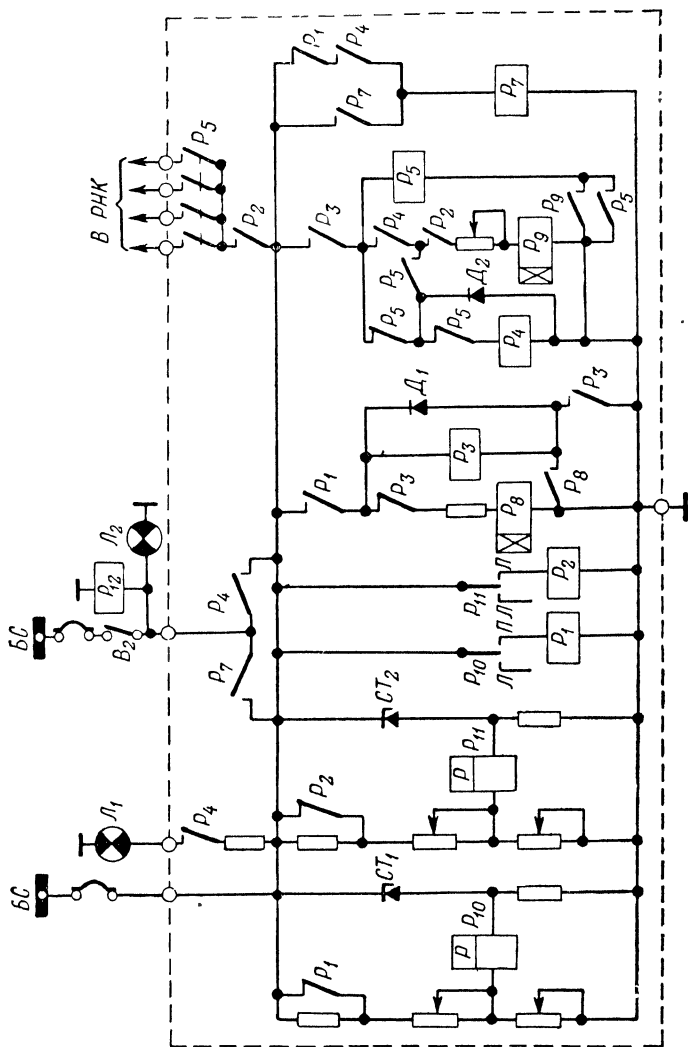


Рис. 3. 6. Схема автомата защиты от перенапряжения (АЗП)

При срабатывании реле P_{10} включается P_1 и через определенное время P_8 ; затем включается P_3 , которое разрывает цепь питания P_8 , блокирует себя и включает P_4 . Реле P_4 включает сигнальные лампы L_1 и L_2 и переключает систему на дублирующий ЦКН с помощью реле P_{12} .

Если напряжение понизилось до номинального, то реле P_{10} , P_1 , P_3 и P_4 отпускают. Причем реле P_3 и P_4 имеют выдержку времени при помощи диодов D для возможности срабатывания реле P_7 , кото-

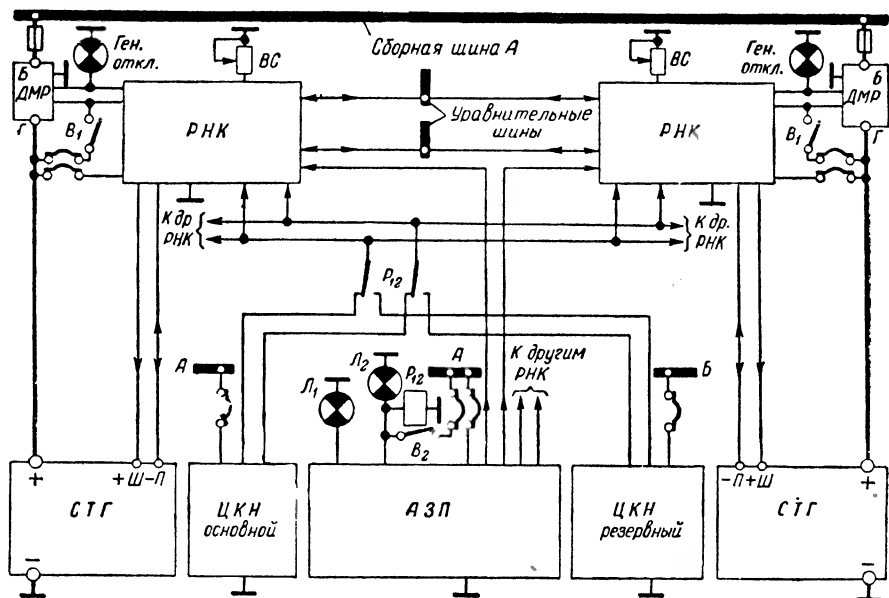


Рис. 3. 7. Схема внешних соединений аппаратуры системы точного регулирования и защиты от перенапряжений

рое блокируется и блокирует реле P_{12} . Если напряжение не снизилось, то необходимо по приборам определить неисправный генератор и отключить его.

Если напряжение повысилось выше 33—34 в, то сработают оба реле P_{10} и P_{11} . Реле P_{10} произведет операции, описанные выше, а реле P_{11} включит P_2 , которое включает реле замедленного действия P_9 . Так как реле P_4 переключает корректоры, то при неисправности основного корректора напряжение восстанавливается, реле P_9 не успевает срабатывать, и схема вернется в исходное положение, заблокировав цепь переключения корректоров.

Если после переключения корректоров напряжение не снизилось, то сработают реле P_9 , P_5 . Реле P_5 разрывает цепь питания P_4 , и система снова переключается на основной корректор.

Реле P_5 подает сигналы в РНК. P_1 у неисправного генератора не сработает и сигнал попадает на обмотку контактора K_p (см. рис.

3.4), который отключает питание цепи возбуждения и замыкает ее накоротко для исключения возможности перемagnичивания генератора.

У исправного генератора к моменту прихода сигнала из АЗП поляризованное реле P_1 успевает сработать и включить реле P_3 , которое разрывает цепь питания K_p и исключает возможность его срабатывания и отключения возбуждения у исправного генератора.

На рис. 3.7 приведена схема внешних соединений аппаратуры системы точного регулирования и защиты от перенапряжений, работа которой рассматривалась выше.

§ 3. ЗАЩИТА ГЕНЕРАТОРОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА И ИХ ФИДЕРОВ

Для сохранения работоспособности энергосистемы при повреждениях генератора или его фидера предусматривается защита от перенапряжений (рассмотрена выше), потери возбуждения, перемagnичивания, перегрузок и коротких замыканий.

Таковую защиту осуществляет дифференциально-минимальное реле (ДМР), которое одновременно служит для автоматического включения и отключения генератора в нормальных режимах.

Существуют различные типы ДМР на токи 200, 400, 600 и 800 а. Все они имеют одно и то же назначение и принципиальную схему (рис. 3.8) и отличаются только вспомогательными элементами и силовыми контакторами.

ДМР выполняет следующие функции:

- включает генератор в сеть, если его напряжение не ниже 14—19 в и превышает напряжение сети на 0,2—1 в;
- отключает генератор от сети при обратном токе (15—35 а для ДМР-400 и 25—50 а для ДМР-600), который возникает при потере возбуждения генератором или к. з. на участке ДМР — генератор;
- не подключает генератор к сети с неправильной полярностью, чем исключается возможность его перемagnичивания;
- выдает сигналы отключения генератора и обрыва фидера на участке от генератора до ДМР.
- обеспечивает неавтоматическое (ручное) включение генератора в сеть.

ДМР состоит из дифференциального реле D_p , контактора K , реле включения P_v , реле защиты P_3 , реле форсирования P_f и реле переключения обмотки дифференциального реле и сигнализации P_n .

Командным элементом является дифференциальное реле. Оно имеет две обмотки — последовательную СО (один виток), по которой проходит ток генератора, и дифференциальную ДО, включенную на разность напряжений генератора и сети.

Магнитная система дифференциального реле (см. рис. 3.8) состоит из стальных пластин 1 и 2, постоянных магнитов 3 и полюсов

4 и 5. Стальной якорь 7 свободно проходит внутри катушек СО и ДО, закреплен на скобе 6 и может поворачиваться на небольшой угол до соприкосновения с контактным винтом 8 или упорным винтом 9.

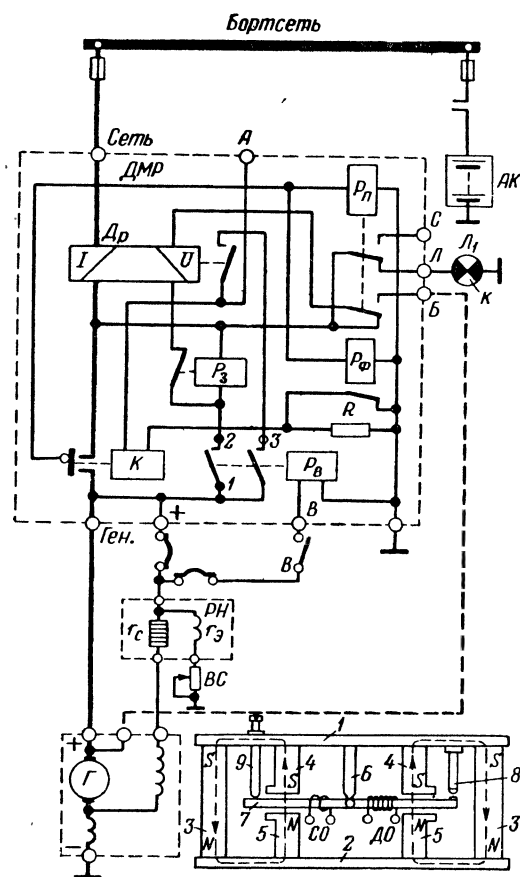


Рис. 3.8. Принципиальная электросхема генератора с защитой ДМР

ре P_v подключается к генератору. Когда напряжение генератора, постепенно увеличиваясь по мере раскрутки двигателя, достигнет 14 в, реле сработает.

При замыкании контактов 1—2 реле P_v обмотка реле P_z и шунтовая обмотка дифференциального реле D_p подключаются на разность напряжений генератора и бортсети.

Если в момент включения реле P_v указанная разность напряжений достигнет величины 12—16 в, то реле P_z сработает и, разомкнув контакты, предохранит обмотку D_p от длительного нахождения

Дифференциальное реле реагирует на величину напряжения, подведенного к его обмоткам, и на направление тока в них. Пока напряжение сети выше напряжения генератора, ток в обмотках СО и ДО протекает от сети к генератору. М. д. с., создаваемая током, действует по направлению потока в якорь от постоянных магнитов, удерживающего якорь 7 в разомкнутом положении с контактом 8.

В зависимости от направления суммарных ампер-витков обмоток якорь реле намагничивается в определенном направлении и концы его притягиваются к неподвижным полюсам противоположной полярности. Реле не имеет противодействующей пружины. Поэтому при обесточивании обмоток якорь занимает то положение, какое он занимал до выключения обмоток.

При замыкании выключателя В обмотка реле

ния под током, так как обмотка D_p рассчитана на длительную работу при напряжении не более 15 в. Реле P_3 также исключает возможность подключения генератора к сети с неправильной полярностью.

По мере возрастания напряжения на генераторе разность напряжений генератора и бортсети уменьшается и, когда достигнет 3—5 в, реле сработает на отпускание, контакты замкнутся и обмотка D_p вновь подключится на разность напряжений.

Если контакты D_p в момент подключения ее обмотки были замкнуты, то магнитное поле, созданное обмоткой, будет такого направления, при котором контакты разомкнутся; если они были разомкнуты, то будут удерживаться магнитным полем в разомкнутом состоянии.

Когда напряжение генератора превысит напряжение бортсети на 0,2—1 в, магнитное поле D_p изменит свое направление и перебросит якорек в положение, при котором контакты D_p замкнутся.

В этом случае обмотка контактора K через контакты 1—3 реле P_v , контакты D_p и контакты реле P_Φ будет подключена на напряжение генератора; контактор сработает и включит генератор в сеть через свои силовые контакты.

При замыкании контактов подается напряжение на обмотку реле P_Φ , которое сработает, разомкнет свои контакты и включит последовательно с обмоткой контактора добавочное сопротивление R , последнее уменьшает ток обмотки контактора, предохраняя ее от перегрева.

Реле P_Φ имеет сравнительно высокую величину напряжения отключения (8—12 в), что приводит при глубоких посадках напряжения к его отпусканию, закорачиванию сопротивления R и увеличению тока обмотки контактора.

Одновременно с реле P_Φ срабатывает реле P_n ; которое переключает конец обмотки D_p с клеммы «Сеть» на фидер генератора, разрывает цепь лампочки «Генератор отключен» и замыкает цепь включения потребителей.

Если напряжение на генераторе будет понижаться и станет ниже напряжения сети, то ток в серийном витке изменит свое направление. Магнитное поле D_p соответственно изменит свое направление и перебросит якорек в другое крайнее положение, при котором контакты D_p разомкнутся. В этом случае контактор отключит генератор, реле P_Φ и P_n от сети, и схема придет к положению «Генератор отключен». Обмотка D_p переключится с генератора на «Сеть» и сопротивление R зашунтируется. Реле P_3 сработает и разорвет цепь обмотки D_p .

Если напряжение на генераторе будет снижаться и дальше и станет меньше 5 в, то реле P_v сработает на отключение и разомкнет цепь обмотки P_3 , его контакты замкнутся, но это опасно для обмотки D_p , так как ее цепь теперь разорвана контактами 1—2 реле P_v . ДМР приходит в исходное положение для включения генератора в сеть, если его напряжение вновь повысится.

При обрыве фидера по серийной обмотке не потечет ток, а по шунтовой начнет протекать ток такого направления, при котором якорек перебрасывается в положение замыкания контактов. Контактор отключается и сбросивает обмотку реле $R_{\text{ш}}$.

ДМР может быть использовано для включения генератора в качестве стартера при запуске авиадвигателя. В этом случае ток подается на клемму А от постороннего источника.

Защита генератора и его фидера при коротких замыканиях должна удовлетворять следующим условиям:

1. Короткое замыкание в фидере или внутри генератора не должно приводить к повреждению самого генератора и выходу из строя энергосистемы.

2. Защита должна отключить поврежденный генератор от сети и погасить его поле возбуждения, разрывая обмотку возбуждения и закорачивая обмотку дополнительных полюсов.

3. Повреждение защиты не должно приводить к ложному отключению генератора от энергосети.

Генераторы постоянного тока не оборудуются специальной защитой от коротких замыканий, ее роль частично выполняют ДМР и максимально-токовые предохранители.

При коротком замыкании происходит следующее.

На участке «Генератор—ДМР» или в самом генераторе:

1. ДМР надежно отключает точку к.з. от внешней сети, если обратный ток не превышает разрывной способности ДМР.

2. Предохранитель генератора не срабатывает ввиду кратковременного прохождения тока и генератор питает точку к.з.

3. При наличии в системе трех и более генераторов разрывная способность ДМР может оказаться недостаточной для отключения системы от поврежденного фидера. Контакты ДМР свариваются. В этом случае предохранитель генератора срабатывает и отключает точку к.з. от внешней сети, но пожароопасность не снижается.

На участке «Предохранитель—ДМР».

1. Срабатывает предохранитель, если достаточна мощность источников энергии внешней сети. Внешняя сеть отключается от точки к.з.

2. Генератор работает на точку к.з., так как ток короткого замыкания для ДМР является прямым.

3. Значительное снижение напряжения (до 1—4 в) на обмотке контактора ДМР вызывает режим «звонка» и может привести к свариванию контактов ДМР. Возникает устойчивый режим к.з. генератора, который наиболее опасен, так как выводит из строя ДМР и генератор.

На генераторной шине:

1. Все источники энергии работают на точку к.з.

2. Глубокое падение напряжения (до 1—4 в), все ДМР входят в режим «звонка», их контакты могут привариваться.

3. При некоторых конфигурациях питательной сети селективная защита может отключить поврежденную шину от сети.

Цепи управления и измерительной аппаратуры имеют протяженность в несколько раз превышающую протяженность силовой цепи, поэтому в этих цепях также устанавливаются автоматы защиты.

Защита генераторов от перегрузок. Продолжительность работы генератора при перегрузках зависит от величины тока и тепловых свойств генератора. Согласно нормам генераторы должны выдерживать перегрузку током $1,5I_{\text{ном}}$ в течение 5 мин и $2I_{\text{ном}}$ в течение 5 сек.

Защита генераторов от перегрузок должна реагировать на нагрев наиболее уязвимых мест генератора и снижать ток его нагрузки в зависимости от условий охлаждения до такой величины, при которой температура нагрева не превышает допустимого предела. Для этой цели в генератор встраивается тепловое реле. Условия полета определяют необходимость снятия нагрузки или отключения генератора.

Применение реле максимального тока не обеспечивает защиты генератора от перегрева, так как оно ограничивает лишь величину тока, а не продолжительность его действия. Кроме того, на л. а. с потребителями большой мощности аккумуляторы не в состоянии покрывать пиковые нагрузки, поэтому нагрузочный ток генераторов нельзя ограничивать и их мощности должны выбираться заранее с учетом всех пиковых нагрузок.

Для защиты генераторов от токов при коротких замыканиях получили распространение тугоплавкие предохранители типа ТП, рассчитываемые на отключение генераторов только при длительных перегрузках.

Глава IV

ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

§ 1. ОСОБЕННОСТИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ГЕНЕРАТОРОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Непрерывный рост мощности потребителей сопровождается увеличением числа и мощности генераторов, при этом возникла необходимость их параллельной работы.

Параллельная работа генераторов в сравнении с отдельной имеет ряд преимуществ:

1. Повышается надежность электроснабжения, так как при выходе из строя части генераторов обеспечивается бесперебойное питание важнейших потребителей.

2. Снижается необходимый резерв мощности источников энергии со 100 % до 50 % и ниже, что позволяет уменьшить полетный вес при сохранении высокой надежности системы электроснабжения.

3. Обеспечивается запуск и питание электродвигателей, превышающих по мощности отдельно взятый генератор, без снижения качества электропитания других потребителей.

4. Создается возможность установки аккумуляторов меньшей емкости.

При параллельной работе генераторов необходимо выполнение следующих условий:

1. Напряжения генераторов должны быть равны.

2. Полярность генераторов, подключаемых к общим шинам, должна быть одинакова.

3. Параллельная работа должна быть устойчивой при значительной разности мощностей генератора и авиационного двигателя (мощность генератора составляет 0,5—2 %).

4. Равномерное распределение нагрузки между параллельно работающими генераторами одинаковой мощности при различных изменениях скоростей вращения. Это достигается за счет выполнения дополнительных условий, рассмотренных ниже.

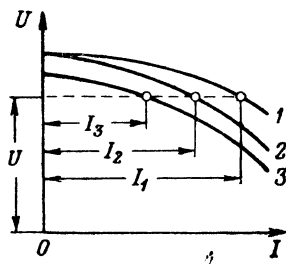


Рис. 4.1. Распределение нагрузок между параллельно работающими генераторами при естественных внешних характеристиках

Если однотипные генераторы равной мощности имеют одинаковые внешние характеристики и скорости вращения, то при параллельной работе они будут отдавать на нагрузку равные токи. Однако при различных внешних характеристиках или скоростях вращения нагрузки распределяются неравномерно.

На рис. 4.1 представлены естественные внешние характеристики генераторов. Из характеристик генераторов 1 и 2 очевидно, что при одинаковых скоростях вращения и нагрузках генератор 2, имеющий более крутую внешнюю характеристику, отдает в сеть меньший ток.

Если генераторы 2 и 3 имеют одинаковые внешние характеристики, но различные скорости вращения $n_2 > n_3$, то генератор 2 будет отдавать в сеть больший ток, чем генератор 3.

В рассмотренных случаях изменение скорости вращения или величины нагрузки сопровождается колебанием напряжения генераторов.

Таким образом, при различных внешних характеристиках и скоростях вращения параллельная работа генераторов практически невозможна без регуляторов напряжения с дополнительными элементами для параллельной работы.

При неравномерном распределении нагрузки между генераторами допустимая мощность нагрузки сети лимитируется наиболее нагруженным генератором.

Для более полного использования располагаемой мощности необходимо равномерное распределение нагрузки между ними, что достигается с помощью регуляторов напряжения.

Параллельная работа генераторов считается удовлетворительной, если при всех режимах эксплуатации нагрузка распределяется равномерно с точностью $\pm 10\%$, а напряжение сети в точке подключения регулятора напряжения поддерживается постоянным в пределах $\pm 2\%$ от номинального.

§ 2. МЕСТО ПРИСОЕДИНЕНИЯ РЕГУЛЯТОРОВ НАПЯЖЕНИЯ

На рис. 4.2 показаны три варианта присоединения регуляторов напряжения: 1 — на общие шины, 2 — на зажимы генераторов и 3 — на клеммы ДМР. Место присоединения рабочей обмотки регулятора существенно влияет на равномерность распределения нагрузки при параллельной работе генераторов.

При присоединении регуляторов на общие шины справедливы выражения:

$$I = I_1 + I_2;$$

$$\frac{U}{R} = \frac{U_1 - U}{R_1} + \frac{U_2 - U}{R_2};$$

$$\frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} = U \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right),$$

где

- I — общий ток нагрузки;
- I_1 и I_2 — токи генераторов;
- U — напряжение на общих шинах;
- U_1 и U_2 — напряжения на зажимах генераторов;
- R — сопротивление цепи нагрузки;
- R_1 и R_2 — сопротивления цепи, соединяющей плюсовые зажимы генераторов с шиной.

При данной схеме включения каждый регулятор реагирует на всякое отклонение напряжения на шине и стремится поддержать его постоянным. При неизменном сопротивлении нагрузки из последнего выражения получаем

$$U_1 R_2 + U_2 R_1 = \text{const.}$$

Это равенство справедливо при бесконечном количестве значений напряжений U_1 и U_2 , т. е. возможно произвольное распределение нагрузки между параллельно работающими генераторами. Для рав-

номерного распределения нагрузки между генераторами при $R_1=R_2$ напряжения на их зажимах должны быть равными, т. е. $U_1=U_2$.

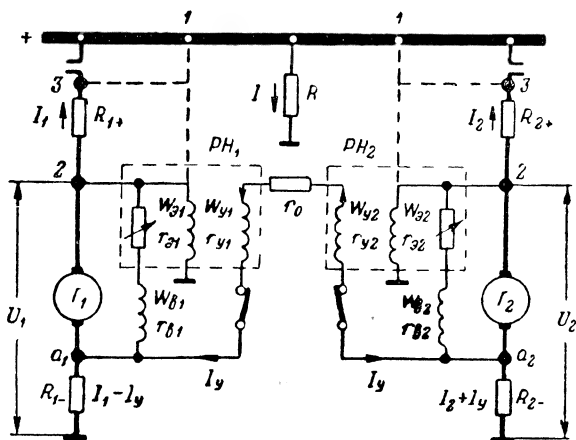


Рис. 4. 2. Принципиальная схема параллельной работы двух генераторов с угольными регуляторами напряжения

При присоединении регуляторов на зажимы генераторов можно написать:

$$U_1 = U + I_1 \cdot R_1;$$

$$U_2 = U + I_2 \cdot R_2,$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_1 - U}{U_2 - U} \cdot \frac{R_2}{R_1};$$

откуда после преобразования получаем

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{(U_1 - U_2) + IR_2}{(U_2 - U_1) + IR_1}.$$

В этом случае регуляторы стремятся поддерживать постоянными U_1 и U_2 . Следовательно, при неизменном токе нагрузки I и постоянных значениях R_1 и R_2 нагрузка может распределяться только однозначно. Для равномерного распределения нагрузки между генераторами при всех значениях I необходимо иметь $R_1=R_2$ и $U_1=U_2$.

Обычно в реальных энергосистемах рабочую обмотку регулятора напряжения присоединяют непосредственно на клемму ДМР. Это позволяет повысить стабильность напряжения на распределительных шинах, а в сочетании с уравнивательной обмоткой получить практически равномерное распределение нагрузки между генераторами.

Уравнительная обмотка, применяемая в регуляторах, предназначена для автоматического выравнивания напряжения генераторов с целью равномерного распределения нагрузки между ними. Она имеет небольшое число витков и располагается на том же сердечнике электромагнита регулятора, что и его рабочая обмотка.

При работе генераторов с угольными регуляторами напряжения уравнительные обмотки включаются между отрицательными зажимами генераторов, как показано на рис. 4. 2.

Ток в уравнительной цепи создается за счет разности потенциалов, возникающей вследствие неодинакового падения напряжения на калиброванных балластных сопротивлениях R_- , включенных в минусовые цепи генераторов.

Если $U_1 > U_2$, а $R_{1+} = R_{2+}$; $R_{1-} = R_{2-}$, то $I_1 > I_2$.

Следовательно, падение напряжения на балластном сопротивлении R_{1-} больше, чем на R_{2-} , и потенциал точки a_2 будет выше потенциала точки a_1 , вследствие чего уравнительный ток потечет от a_2 к a_1 .

М.д.с. уравнительной и рабочей обмоток регулятора RH_1 складываются. Вследствие этого сила притяжения электромагнита возрастает, угольный столбик удлиняется, сопротивление его, а следовательно, и сопротивление цепи возбуждения увеличивается, что приводит к снижению U_1 .

М.д.с. уравнительной и рабочей обмоток регулятора RH_2 вычитаются, что приводит к повышению U_2 .

Таким образом, токи, проходящие по уравнительным обмоткам, стремятся небаланс напряжения $\Delta U = U_1 - U_2$ свести к минимуму.

Для увеличения эффективности действия уравнительных обмоток сопротивление их и соединяющих проводов должно быть минимальным, что увеличивает ампер-витки при малых значениях ΔU .

§ 3. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ДВУХ ГЕНЕРАТОРОВ РАВНОЙ МОЩНОСТИ

При любой величине внешней нагрузки ее распределение между параллельно работающими генераторами равной мощности (рис. 4. 2) должно быть равномерным на всех режимах работы, а это возможно лишь при выполнении пяти условий:

1) совпадение характеристик регуляторов напряжения параллельно работающих генераторов в пределах всего диапазона изменения скоростей вращения. $U = f(n) = \text{const}$, т. е. астатические регуляторы;

2) равенство напряжений настройки регуляторов при холостом ходе: $U_{10} = U_{20}$;

3) равенство сопротивлений плюсовых участков генераторных цепей: $R_{1+} = R_{2+}$;

4) равенство сопротивлений минусовых участков генераторных цепей: $R_{1-} = R_{2-}$;

5) равенство сопротивлений соответствующих уравнительных обмоток и уравнительных проводов: $r_1 = r_2$.

Практически соблюсти все эти условия невозможно, так как всегда имеет место несовпадение характеристик, расстройка регуляторов напряжения и неравенство сопротивлений проводов в плюсовых, минусовых или уравнивательных цепях.

Общий ток нагрузки I в зависимости от ряда факторов соответственно распределяется между генераторами I_1 и I_2 .

Неравномерность распределения нагрузки между генераторами (небаланс токов) характеризуется величиной поперечного тока I_q :

$$I_1 = \frac{I}{2} + I_q;$$

$$I_2 = \frac{I}{2} - I_q.$$

Очевидно, при равномерном распределении нагрузки поперечный ток $I_q = 0$.

Рассмотрим влияние отдельных факторов на характер распределения нагрузки между генераторами и величину поперечного тока:

Х а р а к т е р и с т и к и регуляторов напряжения. Регуляторы могут иметь статическую или астатическую настройку.

Астатические регуляторы поддерживают напряжение неизменным в пределах всего диапазона изменения скорости вращения генераторов $U = f(n) = \text{const}$, что обеспечивает равномерное распределение нагрузок между параллельно работающими генераторами при прочих равных условиях.

Практическое применение получили регуляторы со статической настройкой и одинаковым статизмом. При расходящихся характеристиках нагрузки распределяются неравномерно за исключением скоростей, при которых производилась настройка регуляторов напряжения.

Поскольку скорости вращения авиадвигателей в полете почти одинаковы и изменяются практически одновременно, то допускается установка регуляторов напряжения со статизмом до $\pm 0,5$ в во всем диапазоне изменения скоростей.

При отключении одного из генераторов необходимо размыкать уравнивательную цепь, в противном случае напряжение работающих генераторов будет снижаться действием уравнивательной обмотки.

Н е р а в е н с т в о напряжений настройки регуляторов ($U_{10} > U_{20}$; $R_{1+} = R_{2+} = R_+$; $R_{1-} = R_{2-} = R_-$) вызывается:

- а) неполным соответствием характеристик совместно работающих регуляторов напряжения;
- б) неточностью настройки регуляторов на равные напряжения;
- в) расстройкой регуляторов в процессе работы;
- г) влиянием изменяющихся температурных условий вследствие несовершенства температурной компенсации.

При разомкнутой цепи уравнительной обмотки справедливы следующие равенства:

$$U_{10} - I_1 R_{1+} = U_{20} - I_2 R_{2+};$$

$$I_1 + I_2 = I;$$

$$I_{q0} = \frac{U_{10} - U_{20}}{R_{1+} + R_{2+}} = \frac{\Delta U}{R_{1+} + R_{2+}},$$

где I_{q0} — поперечный ток, характеризующий неравномерность распределения нагрузки между генераторами при разомкнутой уравнительной цепи.

Величина этого тока не зависит от нагрузки и для данной расстройки регуляторов является величиной постоянной. Даже при холостом ходе, когда $I=0$, существует некоторый поперечный ток, бесполезно нагревающий генераторы. В этом случае один из генераторов работает в двигательном режиме.

При замыкании цепи уравнительных обмоток поперечный ток I_q значительно уменьшается ($I_q < I_{q0}$), так как в этом случае напряжение более нагруженного генератора снижается, а менее нагруженного возрастает.

Неравенство сопротивлений плюсовых участков генераторных цепей

$$U_{10} = U_{20}; R_{1+} \neq R_{2+}; R_{1-} = R_{2-}.$$

Для мощных энергосистем сопротивления проводов очень малы (тысячные доли ома), поэтому всякое ухудшение контактных соединений может привести при эксплуатации к значительной разности сопротивлений плюсовых участков.

При разомкнутой уравнительной цепи нагрузка генераторов распределяется обратно пропорционально сопротивлениям положительных участков их цепей.

При замкнутой уравнительной цепи благодаря действию уравнительных обмоток неравномерность распределения нагрузки между генераторами относительно невелика.

Неравенство сопротивлений отрицательных участков генераторных цепей ($U_{10} = U_{20}; R_{1+} = R_{2+}; R_{1-} \neq R_{2-}$).

Величина поперечного тока при неравенстве отрицательных участков значительно больше, чем при том же неравенстве положительных участков.

При неравенстве балластных сопротивлений и наличии уравнительной обмотки нагрузка между генераторами распределяется более неравномерно, чем при разомкнутой уравнительной цепи, поэтому необходимо строго соблюдать равенство балластных сопротивлений. Допустимы отклонения не более 5%.

§ 4. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА НЕСКОЛЬКИХ ГЕНЕРАТОРОВ РАВНОЙ МОЩНОСТИ

При параллельной работе нескольких генераторов напряжение каждого из них поддерживается постоянным с помощью своего автоматического регулятора напряжения. Очевидно, для равномерного распределения нагрузки между ними необходимо выполнять условия, отмеченные для двух генераторов.

Рассмотрим практический случай параллельной работы генераторов, когда один, имеющий повышенное напряжение, может недопустимо перегрузиться, а остальные работать с недогрузкой.

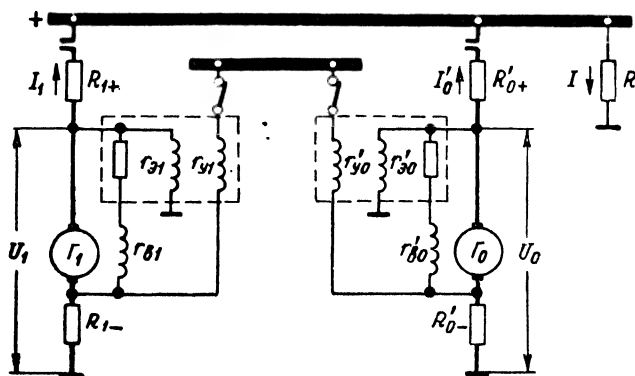


Рис. 4. 3. Принципиальная схема параллельной работы двух генераторов различной мощности

Положим, что

$$\begin{aligned} U_{20} &= U_{30} = \dots = U_{n0} = U_0; & U_{10} > U_0; \\ R_{2+} &= R_{3+} = \dots = R_{n+} = R_{0+}; & R_{1+} \neq R_{0+}; \\ R_{2-} &= R_{3-} = \dots = R_{n-} = R_{0-}; & R_{1-} \neq R_{0-}. \end{aligned}$$

При этих условиях параллельную работу n генераторов можно рассматривать как работу двух генераторов различной мощности, схема которых приведена на рис. 4. 3. Параметры этих генераторов будут следующие:

$$\begin{aligned} &U_{10}; U_0 \text{ — напряжения настройки генераторов;} \\ &I_1; I'_0 = I_0(n-1) \text{ — токи, отдаваемые генераторами;} \\ &R_{1+}; R'_{0+} = R_{0+} \frac{1}{n-1} \text{ — сопротивления плюсовых цепей генераторов;} \\ &R_{1-}; R'_{0-} = R_{0-} \frac{1}{n-1} \text{ — сопротивления минусовых цепей генераторов;} \end{aligned}$$

$r_1=r_0; r'_0=r_0 \frac{1}{n-1}$ — сопротивления уравнивательной обмотки;

$r_{\text{э}1}=r_{\text{э}}; r'_{\text{э}}=r_{\text{э}} \frac{1}{n-1}$ — сопротивления рабочих обмоток регуляторов напряжения.

Очевидно, для распределения нагрузки между генераторами пропорционально их номинальной мощности сопротивления плюсовых и минусовых цепей генераторов должны быть обратно пропорциональны мощности генераторов:

$$\frac{R_{1+}}{R'_{0+}} = \frac{R_{1-}}{R'_{0-}} = \frac{P'_0}{P_0} = n-1.$$

При этом $U_{10}=U_0$; $R_{1+}=R_{0+}$; $R_{1-}=R_{0-}$; $I_{qn}=0$. Если эти условия не выполняются, возникнет поперечный ток.

При параллельной работе n генераторов одинаковой мощности величина поперечного тока может достигать удвоенного значения поперечного тока двух параллельно работающих генераторов.

При произвольной нагрузке I сети степень перегрузки перевозбужденного генератора определяется коэффициентом относительной перегрузки

$$K_{\text{п}} = j + \frac{\Delta U}{R_{0+} I_{\text{ном}}} \frac{n-1}{1+\beta} - j \frac{\Delta R_{+}}{R_{0+}} \frac{1}{n(1+\beta)} - j \frac{\Delta R_{-}}{R_{0-}} \frac{\beta}{n(1+\beta)};$$

где

$$j = \frac{I}{I_{\text{ном}}};$$

$$\Delta U = U_{10} - U_0;$$

$$\Delta R_{+} = R_{1+} - R_{0+};$$

$$\Delta R_{-} = R_{1-} - R_{0-};$$

β — коэффициент, учитывающий число витков и сопротивления рабочих и уравнивательной обмоток регуляторов напряжения.

При отклонениях в настройке регуляторов нельзя получить от энергосистемы номинальную мощность, равную суммарной мощности всех генераторов.

В связи с изложенным в энергосистемах с параллельной работой n генераторов должны применяться более точные регуляторы напряжения, обладающие более стабильными параметрами, чем при двух параллельно работающих генераторах.

§ 5. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ГЕНЕРАТОРОВ С АККУМУЛЯТОРАМИ

Параллельная работа генераторов с аккумуляторами возможна при:

1. Равенстве напряжений генераторов и аккумуляторов.

2. Одинаковых полярностях при присоединении к сборным шинам.

На рис. 4.4 представлена принципиальная схема соединений генератора и аккумулятора при параллельной работе.

Для выяснения распределения токов при параллельной работе генератора с аккумулятором сопоставим внешние характеристики аккумулятора и генератора, работающего с регулятором напряжения. Эти характеристики приведены на рис. 4.5.

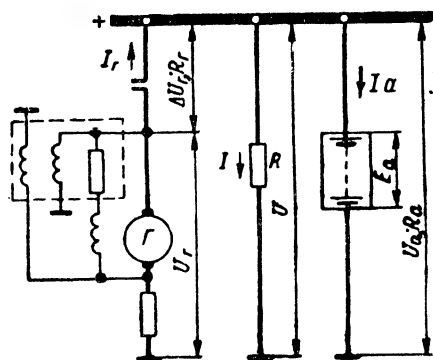


Рис. 4.4. Принципиальная схема соединений генератора и аккумулятора при параллельной работе:

U_r — напряжение между плюсовым зажимом генератора и массой; I_r — ток, отдаваемый генератором в сеть; R_r — сопротивление участка цепи от плюсового зажима генератора до плюсовой шины; E_a — э. д. с. аккумулятора; I_a — ток аккумулятора (положительный при разряде и отрицательный при заряде); R_a — сопротивление всей цепи аккумулятора между положительной шиной и массой; U — напряжение на сборных шинах; I — ток нагрузки; R — сопротивление нагрузки

ходится под напряжением сборной шины $U_a = U$. Рассмотрим четыре характерных случая.

1. Нагрузка в сети отсутствует $I = 0$, тогда $U_a = U_0 = U_r - \Delta U_{r0}$. В этом случае генератор нагружается только током I_{r0} , идущим на подзаряд аккумулятора I_{a0}

$$I_{r0} = I_{a0}.$$

2. В сеть подключена нагрузка I_1 , напряжение на сборной шине снижается до U_1 , тогда $U_{a1} = U_1 = U_r - \Delta U_{r1}$. В этом случае генератор нагружается током сети и током заряда аккумулятора

$$I_{r1} = I_1 + I_{a1}.$$

3. Нагрузка в сети увеличена до I_2 , так что напряжение на сборной шине снизилось до величины э.д.с. аккумулятора $U_{a2} = U_2 =$

$=U_r - \Delta U_{r2} = E_a$. В этом случае заряд аккумулятора прекращается и весь ток генератора идет на нагрузку сети

$$I_{r2} = I_2.$$

4. Нагрузка в сети увеличена до I_3 , так что напряжение на сборной шине снизилось до U_3 , меньшей э. д. с. аккумулятора $U_3 < E_a$. Тогда $U_{a3} = U_3 = U_r - \Delta U_{r3} < E_a$. Аккумулятор переходит в режим разряда. Ток нагрузки становится равным сумме токов генератора и аккумулятора

$$I_3 = I_{r3} + I_{a3},$$

причем доля тока аккумулятора возрастает со снижением напряжения генератора.

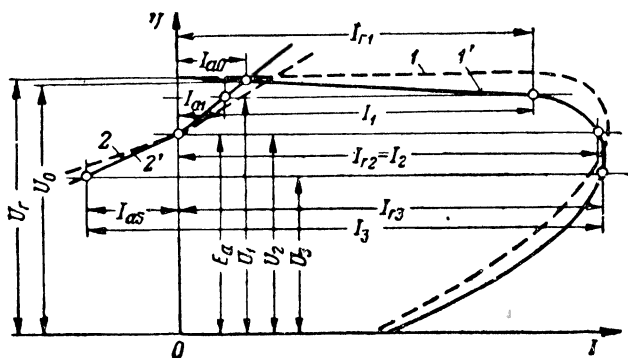


Рис. 4. 5. Внешние характеристики генератора и аккумулятора

Таким образом, распределение тока нагрузки между генератором и аккумулятором зависит от их внешних характеристик, причем пока $E_a < U$ — аккумулятор является потребителем. Независимо от числа параллельно работающих генераторов и аккумуляторов напряжение на общих шинах получается одним и тем же:

$$\begin{aligned} U &= U_a = E_{a1} - I_{a1}R_{a1} = \dots = E_{an} - I_{an}R_{an} = \\ &= U_{r1} - I_{r1}R_{r1} = \dots = U_{rn} - I_{rn}R_{rn}, \end{aligned}$$

Ток нагрузки между ними распределяется в соответствии с внешними характеристиками и напряжением на общей шине.

Суммарный ток всех параллельно работающих генераторов определяется как

$$\sum_{k=1}^n I_{rk} = I \pm I_a.$$

Зарядный или разрядный ток любого аккумулятора определится как

$$I_a = \frac{E_a - U}{R_a}.$$

У наиболее заряженного аккумулятора характеристика проходит выше, чем у разряженного, и имеет менее падающий характер. Следовательно, наиболее заряженный аккумулятор потребляет меньший зарядный ток и оказывает помощь генератору при более высоком напряжении на сборной шине.

При зарядке аккумулятора постоянным напряжением прирост емкости зависит от остаточной емкости, температуры электролита и продолжительности заряда.

Приближенно прирост емкости в % может быть определен по формуле В. С. Кулебакина

$$\Delta q \% = [30 - 0,17 q_{\text{ост}} \%] \frac{25 + \nu}{50} \sqrt{t},$$

где t — время заряда в часах, причем $t \leq 3$;

$q_{\text{ост}}$ — остаточная емкость в % от номинальной емкости;

ν — температура электролита ($\nu \geq -25^\circ \text{C}$).

Однако следует иметь в виду, что бортсеть с номинальным напряжением 28,5 в не обеспечивает полной зарядки 24-вольтовых аккумуляторов, так как для восстановления полной емкости необходимо напряжение сети 30—32 в.

Глава V

СХЕМЫ ПЕРВИЧНЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМ ПОСТОЯННОГО ТОКА

§ 1. ЗАЩИТА ГЕНЕРАТОРНЫХ ШИН И СОЕДИНИТЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ

В энергетических системах постоянного тока получила распространение токовая защита с плавкими предохранителями и тепловыми автоматами. На рис. 5.1 представлены четыре возможных варианта схем токовой защиты генераторных шин и соединительных линий от короткого замыкания. Номинальный ток предохранителей (автоматов защиты) берется 1,2÷1,3 номинального тока генератора. При к. з. на одной шине должны сработать предохранители во всех линиях, соединяющих данную шину с другими. Селективность работы защиты зависит от схемы соединения шин.

Схема а. При одинаковых источниках, присоединенных к шинам 1, 2 и 5 при к. з. на любой из шин 1—5 токи во всех линиях, присоединенных к поврежденной шине, примерно одинаковы и равны току генератора, который в установившемся режиме обычно не пре-

вышает номинального. Следовательно, предохранители в линиях при к.з. на шинах не срабатывают.

Схема б. При к.з. на шине ток в ее соединительной линии равен сумме токов генераторов, присоединенных к исправным шинам. Вследствие этого предохранитель в линии, идущей к шине с к.з., сгорит первым и селективно отключит ее от остальных шин.

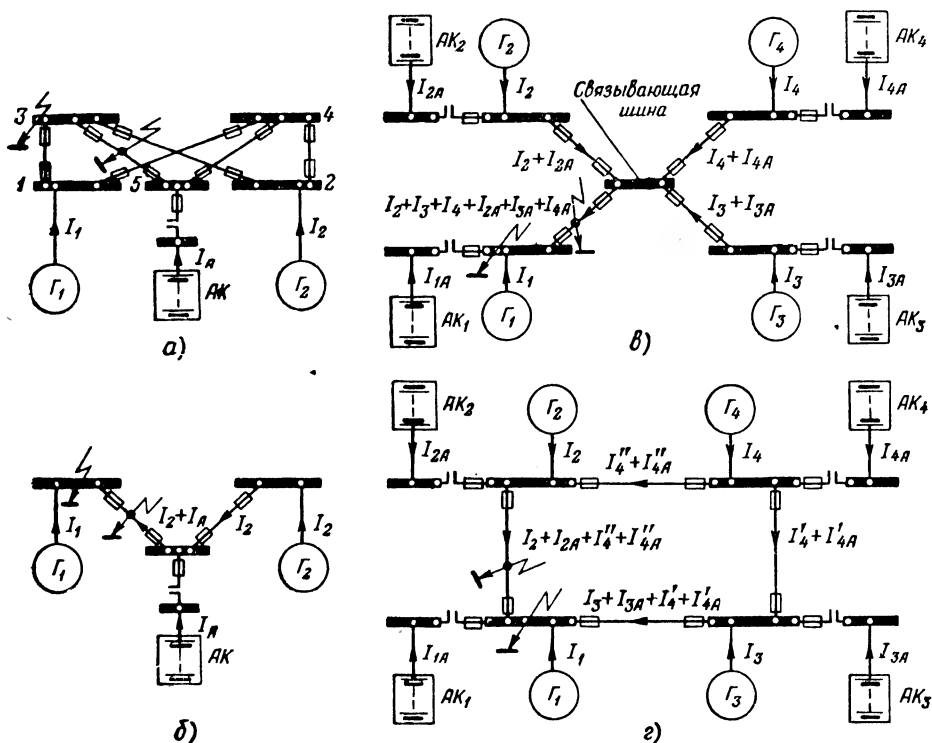


Рис. 5.1. Защита генераторных шин и соединительных линий при к.з.

Схема в. При к.з. на шине ток в ее соединительной линии равен сумме токов остальных линий, следовательно, предохранитель в линии, идущей к шине с к.з., сгорит первым, и селективно отключит ее от остальных шин.

Схема г. При к.з. на шине ток в линии, идущей к ней, в три раза больше, чем в остальных линиях. Благодаря этому защита селективно отключит шину с к.з.

Схема в обеспечивает высокое быстродействие, а схема г большую надежность узла источников питания при обрывах или к.з. в линиях питания.

Во всех схемах при к.з. в линии защита срабатывает селективно, отключая поврежденную линию от исправной сети.

Отдельные повреждения регуляторов напряжения вызывают значительное повышение напряжения в сети по сравнению с номинальным, что может привести к выходу из строя ряда потребителей и тяжелым авариям летательного аппарата, поэтому в энергосистемах должна предусматриваться защита от перенапряжений.

§ 2. ЭНЕРГОСИСТЕМА ПОСТОЯННОГО ТОКА С РАДИАЛЬНОЙ ПИТАТЕЛЬНОЙ СЕТЬЮ

На рис. 5.2 представлена принципиальная схема энергосистемы постоянного тока с радиальной одноканальной защищенной питательной сетью.

Основными источниками энергии являются два стартер-генератора ГСР-СТ-6000А в комплекте с регуляторами напряжения Р-25А и дифференциально-минимальными реле ДМР-400А. Вспомогательным источником энергии является аккумуляторная батарея 12-САМ-28.

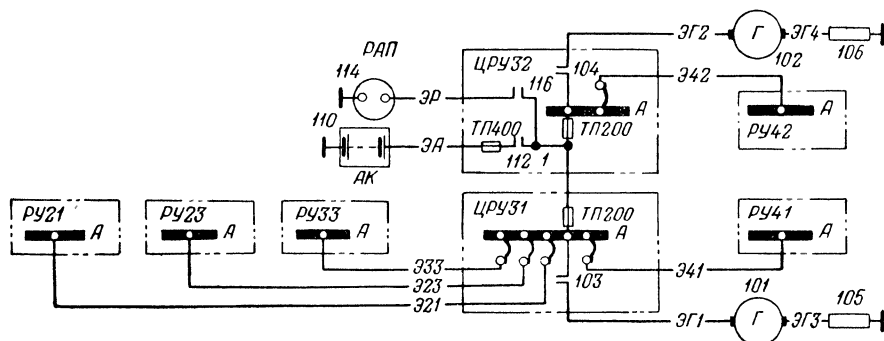


Рис. 5.2. Схема энергосистемы постоянного тока с радиальной питательной сетью

В схеме предусмотрено одностороннее, одноканальное питание распределительных шин 21А, 23А, 33А, 41А, 42А и двустороннее одноканальное питание распределительных шин 31А и 32А.

В аварийных режимах в зависимости от характера повреждений могут наблюдаться следующие явления:

1. При обрывах и коротких замыканиях в линиях питания шин обесточиваются все потребители, подключенные к соответствующим шинам.

2. Токи короткого замыкания на распределительных шинах достигают 800—1500 а, а на расстоянии 1 м от АЗС — 1500—1700 а, превышая разрывные способности АЗС.

3. При коротком замыкании в точке 1 оба ДМР (103, 104) входят в режим звонка, при этом возможно залипание контактов ДМР. Через 10—12 сек срабатывают предохранители ТП-200 и далее ТП-400. Переходной процесс сопровождается глубокой посадкой напряжения. После перегорания предохранителей напряжение в питательной сети восстанавливается, а энергосистема превращается

в две изолированные системы с питанием распределительных шин от соответствующих генераторов.

4. При коротком замыкании на шине 31А наблюдается звонковый режим ДМР. Через 2—3 сек сгорает предохранитель ТП-200 у этой шины и тогда шины 32А и 42А сохраняют работоспособность, питаясь от генератора 102 и аккумулятора 110. Если первым сгорает предохранитель ТП-200 у шины 32А и далее у шины 31А, то шины 32А и 42А получают питание только от генератора 102.

5. При коротком замыкании на шине 32А происходят явления, подобные указанным в п. 4, и соответственно сохраняется работоспособность шин 31А, 21А, 23А, 33А и 41А с питанием от генератора 101 и аккумулятора 110 или только от генератора 101.

В силу отмеченных недостатков энергосистема не обеспечивает надежного бесперебойного питания потребителей в аварийных режимах полета и в таком виде не рекомендуется для применения на летательных аппаратах, однако принцип радиального питания РУ второстепенных потребителей целесообразно использовать при проектировании.

§ 3. ЭНЕРГОСИСТЕМА ПОСТОЯННОГО ТОКА С МАГИСТРАЛЬНОЙ ПИТАТЕЛЬНОЙ СЕТЬЮ

На рис. 5.3 представлена принципиальная схема энергосистемы постоянного тока с магистральной одноканальной защищенной питательной сетью и резервированным питанием аварийной распределительной шины 22В.

Основными источниками энергии являются два стартер-генератора ГСР-СТ-12000 в комплекте с регуляторами напряжения РУГ-82 и дифференциально-минимальным реле ДМР-400А. Вспомогательным источником энергии являются две аккумуляторные батареи 12-САМ-28.

Главное распределительное устройство имеет две шины: основную 22А и аварийную 22В.

При нормальной работе шина 22В контактором 115 подключена к шине 22А, но при отказе контактора шина 22В не получает питания. При исчезновении напряжения на шине 22А (обрыв или к.з.) отпускают реле времени 119 и 120, срабатывают контакторы 117 и 118 и аварийная шина 22В переходит на питание от резервной сети (ЭГ5; ЭГ6).

Работа энергосистемы при обрывах проводов:

1. При обрыве провода Э1 обесточивается основная шина 22А, лишая питания соответствующую группу потребителей. Аварийная шина 22В переходит на питание от резервной сети.

2. При обрывах проводов Э' и Э'' оба генератора отключаются от сети.

Работа энергосистемы при коротких замыканиях:

1. При к.з. на шине 22А или проводе Э1 срабатывает предохранитель ТП-400. Основная шина обесточивается. Шина 22В получает питание от резервной сети.

2. При к.з. на шине 22В контакторы 115, 117, 118 входят в режим звонка и привариваются. Питание шин идет через провода Э1, ЭГ5 и ЭГ6. Предохранители ТП-400 и ИП-100 сгорают. Шины 22А и 22В обесточиваются, оставляя все потребители без питания.

3. При к.з. в точке 1 сгорает предохранитель ИП-250 у шины 42А. При малых оборотах ток короткого замыкания генератора не-

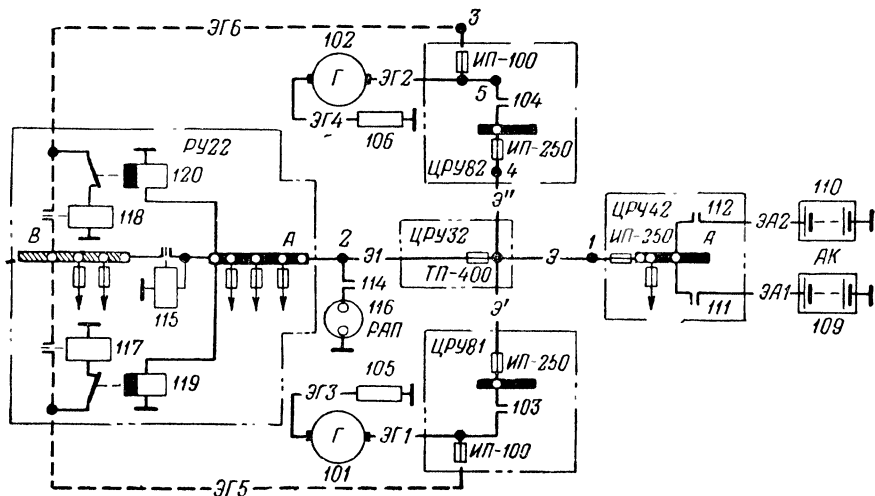


Рис. 5.3. Схема энергосистемы постоянного тока с магистральной питательной сетью

достаточен для перегорания предохранителей ИП-250 у генераторов. ДМР-400 входят в режим звонка и их контакты могут привариться. Вся сеть, включая и аварийную, остается короткозамкнутой.

4. При к.з. в точке 3 отключается ДМР генератора 102; последний продолжает питать точку к.з. Предохранитель ИП-100 перегорает. ДМР вновь подключает генератор 102 к сети.

5. При к.з. в точке 4 ДМР-104 входит в режим звонка. Перегорает предохранитель ИП-250; остальная защита может не сработать, в этом случае сеть остается с к.з.

6. При к.з. в точке 5 ДМР отключает генератор 102 от сети. Генератор работает на точку к.з.

7. При к.з. на шине 42А аккумуляторный узел выходит из строя. Введение автоматического резервирования цепи питания аварийной шины усложняет и утяжеляет сеть, но не обеспечивает бесперебойное питание потребителей при обрыве и к.з. в проводах и распределительных шинах. Нерационально используются резервные провода ЭГ5 и ЭГ6.

§ 4. ЭНЕРГОСИСТЕМА ПОСТОЯННОГО ТОКА С РАДИАЛЬНО-МАГИСТРАЛЬНОЙ, РЕЗЕРВИРОВАННОЙ, ЗАЩИЩЕННОЙ ПИТАТЕЛЬНОЙ СЕТЬЮ

На рис. 5.4 представлена принципиальная схема энергосистемы постоянного тока с радиально-магистральной, резервированной, защищенной питательной сетью.

Основными источниками энергии являются два генератора ГСР-12000, работающие в комплекте с регуляторами напряжения Р-25А и дифференциально-минимальными реле ДМР-400. Вспомогательным источником энергии является аккумуляторная батарея 12-САМ-53.

Питательная сеть состоит из первичных и вторичных распределительных шин. Вторичные шины двухсекционные, каждая секция получает независимое питание от первичных шин. Предусмотрена двусторонняя защита питательной сети предохранителями и контакторами, обмотки которых питаются от защищаемой линии через автоматы защиты и выключатели.

Преимущества. 1. Сеть сравнительно проста по конфигурации и обеспечивает прокладку проводов к секциям распределительных шин по разным бортам, что значительно увеличивает живучесть сети.

2. Распределительные шины 12А, 12Б, 21А, 21Б, 52А, 52Б, питающие основную массу потребителей, расположены в кабинах экипажа и обеспечивают удобство подготовки и эксплуатации сети.

3. Радиальное питание вторичных распределительных шин позволяет легко обеспечивать селективность их защиты.

4. В случае обрыва или к.з. собственной линии питания вторичной распределительной шины питание автоматически переключается на работающую линию.

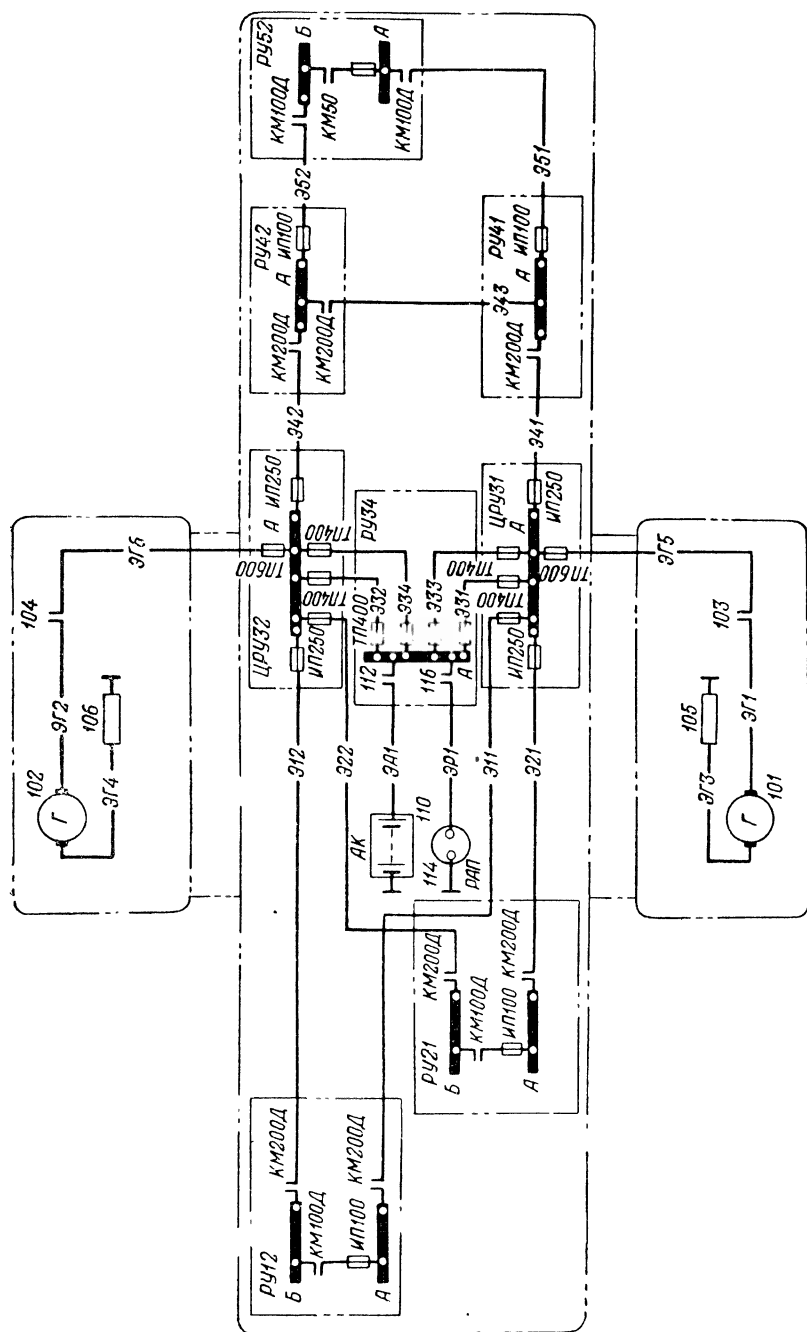
Пример. При к.з. в проводе Э11 предохранитель ИП-250 сгорает, контактор КМ-200Д отпускает, а контактор КМ-100Д включается, обеспечивая питанием шину 12А по каналу Э12.

Аналогично обеспечивается переключение на другой канал при к.з. в проводах остальных вторичных распределительных шин

Недостатки. 1. При к.з. на шине 12А имеет место глубокое снижение напряжения, которое вызывает «хлопки» КМ-200Д, приводящие к спеканию контактов. Далее срабатывает контактор КМ-100Д и при селективности защиты сгорает ИП-100. Шина 12А обесточивается, но защита не всегда срабатывает селективно за счет изменения характеристик предохранителей при прохождении тока к.з. В этом случае обе шины обесточиваются.

Аналогично протекают процессы при к.з. на других вторичных распределительных шинах.

2. При к.з. на шине 52А (52Б) процесс происходит аналогично отмеченному в п. 1, кроме того, возможны «хлопки» КМ-200Д и обесточивание шины 42А.



3. При к.з. в проводах с ИП-250 вблизи шин 31А (32А) наблюдаются «хлопки» контакторов ДМР. Предохранитель ИП-250 срабатывает и «хлопки» прекращаются.

4. При к.з. на шине 31А (32А) напряжение на клеммах генератора снижается до 0,8—1,6 в, ДМР входит в режим «звонка». От генератора проходит ток 500—575 а, контакты ДМР привариваются, предохранитель ТП-600 не срабатывает. Сеть остается короткозамкнутой. Предохранители ТП-400 перегорают, отключая аккумуляторы от шины 31А (32А).

5. При к.з. в проводе ЭГ5 ДМР входит в режим «звонка», его контакты привариваются, ДМР и генератор выходят из строя.

6. При к.з. в проводе ЭГ1 ДМР отключает точку к.з. от сети, а генератор продолжает питать точку к.з.

7. Основная масса потребителей, включая и силовые, питается с распределительных шин кабин экипажа, что значительно увеличивает вес проводов потребителей.

8. Установившиеся токи к.з. достигают 1500—4000 а и представляют серьезную пожароопасность. Максимальные величины токов у шины аккумулятора.

Выводы

1. Система обладает повышенной живучестью и надежностью распределительных устройств за счет двусторонней защиты, резервного переключения питания шин и прокладки проводов по разным бортам.

2. При к.з. на шинах распределительных устройств контакторы входят в режим «звонка», что приводит к спеканию контактов.

3. Наибольшую пожароопасность представляют к.з. на первичных распределительных шинах.

Система обладает повышенной живучестью и надежностью в сравнении с рассмотренными, но наличие указанных недостатков ограничивает ее применение.

§ 5. ЭНЕРГОСИСТЕМА ПОСТОЯННОГО ТОКА С КОМБИНИРОВАННОЙ, НЕЗАЩИЩЕННОЙ ПИТАТЕЛЬНОЙ СЕТЬЮ

На рис. 5.5 представлена принципиальная схема энергосистемы постоянного тока с комбинированной незащищенной питательной сетью, включающей элементы радиальной, магистральной и замкнутой сетей.

Основными источниками энергии являются четыре генератора ГСР-18000 в комплекте с регуляторами напряжения РУГ82 и дифференциально-минимальными реле ДМР-600.

Резервным источником энергии является аккумуляторная батарея 12-САМ-53, которая может подключаться к основной или аварийной сети.

Энергосистема состоит из двух питательных сетей:

1. Основной сети, включающей главное, многоканальное, незащищенное кольцо с первичными распределительными шинами и радиальную сеть со вторичными распределительными шинами.

2. Аварийной сети радиального типа.

Преимущества. 1. Замкнутая, многоканальная конфигурация основной сети обеспечивает бесперебойное питание потребителей при обрыве проводов в любой точке питательного кольца.

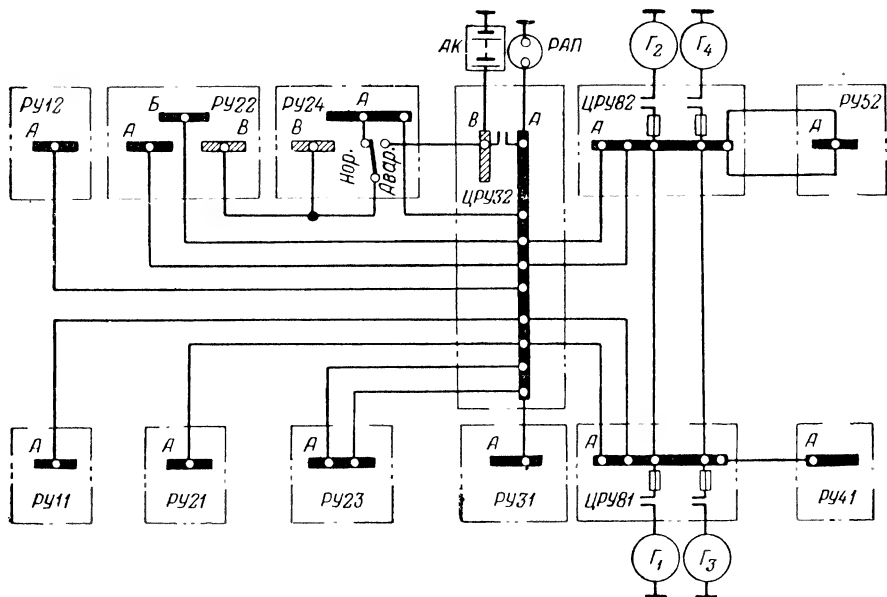


Рис. 5.5. Схема энергосистемы постоянного тока с комбинированной незащищенной питательной сетью

2. При отказе генераторов распределительные шины 22В и 24В вручную подключаются к аккумуляторной батарее, обеспечивающей питанием приборы и маломощные потребители из системы управления.

Недостатки. 1. При к. з. генераторов напряжение на их клеммах падает до 0,8—5,0 в.

2. При к. з. на участке «Генератор—ДМР» генератор отключается от сети и питает точку к. з.

3. При к. з. на участке «ДМР—сеть» ДМР входят в режим «збонка», их контакты привариваются и точку к. з. питают все источники энергии. Вся сеть оказывается короткозамкнутой.

4. При к. з. в любой точке кольцевых или радиальных сетей, а также на распределительных шинах происходят явления, указанные в п. 3.

5. При к. з. на участках сети, находящихся на значительном расстоянии от источников питания, напряжение на клеммах генераторов не падает ниже 5 в и контакты ДМР не «хлопают», однако сеть оказывается короткозамкнутой.

6. Вследствие большой суммарной мощности источников энергии установившиеся токи при металлических к. з. достигают 5000—7000 а. Такие токи весьма опасны в пожарном отношении для электросети и л. а. в целом. Огромные токи к. з. увеличивают вероятность возникновения пожара и при перемежающихся к. з.

7. Аварийная сеть выполнена без защиты и обладает недостатками, присущими основной сети.

Выводы

1. Основная сеть не защищена, имеет значительную протяженность, что является причиной легкой уязвимости при коротких замыканиях.

2. При любом виде к. з. система выходит из строя и возможно возникновение пожара.

3. Система сохраняет живучесть только при обрывах проводов без к. з., но такой вид повреждения мало вероятен.

4. Наличие аварийной сети несколько повышает надежность питания, однако к. з. выводит из строя и аварийную сеть.

§ 6. ЭНЕРГОСИСТЕМЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА С КОЛЬЦЕВЫМИ МНОГОКАНАЛЬНЫМИ ЗАЩИЩЕННЫМИ ПИТАТЕЛЬНЫМИ СЕТЯМИ *

Энергосистемы постоянного тока с кольцевыми многоканальными питательными сетями с селективной защитой практически отвечают всем требованиям максимальной надежности и бесперебойности электроснабжения потребителей энергией высокого качества и находят широкое применение на летательных аппаратах различных типов.

На рис. 5.6 представлена схема энергосистемы постоянного тока с кольцевой многоканальной защищенной питательной сетью.

Сеть имеет двухканальное защищенное первичное кольцо с первичными распределительными шинами 41А, 42А, 43А и 44А, расположенными в соответствующих ЦРУ, и вторичные многоканальные защищенные кольца с распределительными шинами 21А, 21Б, 21В, 22А, 22Б. и 22В, расположенными в соответствующих вторичных распределительных устройствах РУ21 и РУ22. Количество первичных и вторичных распределительных устройств определяется условиями компоновки и расположением источников и потребителей электроэнергии.

Основными источниками энергии являются четыре стартер-генератора (Γ_1 — Γ_4). Генераторы подают энергию к собственным

* Разработаны автором в 1950—1953 гг.

главным шинам А, которые являются первичными распределительными пунктами в системе.

Аккумуляторы служат резервными источниками и подключены непосредственно к своим шинам В, которые соединяются с главными шинами генераторов с помощью контакторов. Аккумуляторные шины 42В и 44В соединены также с аварийными шинами 21В и 22В.

В нормальном режиме все распределительные шины получают питание от генераторов, при этом аккумуляторы подзаряжаются от

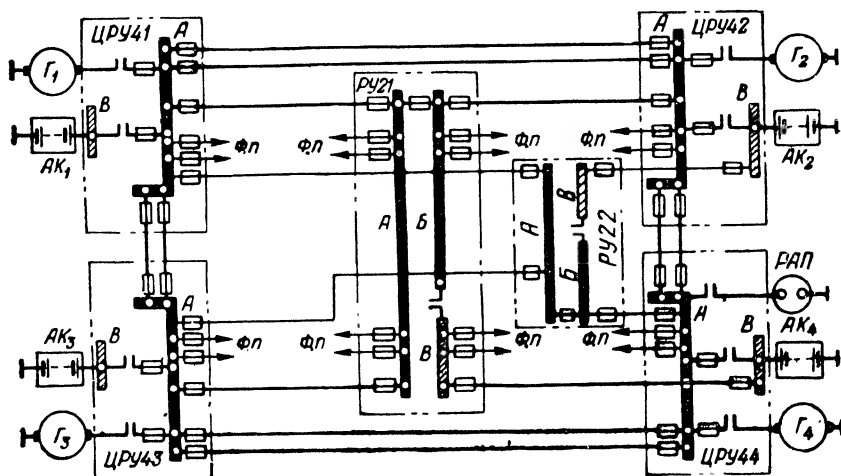


Рис. 5.6. Схема энергосистемы постоянного тока с кольцевой многоканальной защищенной питательной сетью с четырьмя генераторами

сети и одновременно служат демпфером для снятия кратковременных пиковых нагрузок.

Кольцевая многоканальная защищенная питательная сеть практически сохраняет живучесть до последнего источника энергии при неоднократных замыканиях и обрывах линий питания. Именно поэтому в данной схеме роль аварийной системы сводится только к работе при чрезвычайных обстоятельствах, т. е. при отказе всех генераторов, когда источниками энергии являются только аккумуляторы.

При отказе всех генераторов (случай практически маловероятный) особенно ответственные потребители, необходимые для посадки или продолжения полета (если работают авиадвигатели), автоматически переключаются на питание с аварийных шин В, т. е. непосредственно от аккумуляторов.

Аварийные шины В во вторичных распределительных устройствах получают питание через один из основных каналов непосредственно с шин аккумуляторов. Аварийные шины отключаются от

основной системы автоматически с помощью реле напряжения, настроенного на номинальное напряжение главной шины генератора, или вручную установкой переключателя аккумуляторов в положение «Аварийный режим».

Подобная сеть может с успехом применяться на средних и тяжелых л. а. с любым количеством авиадвигателей.

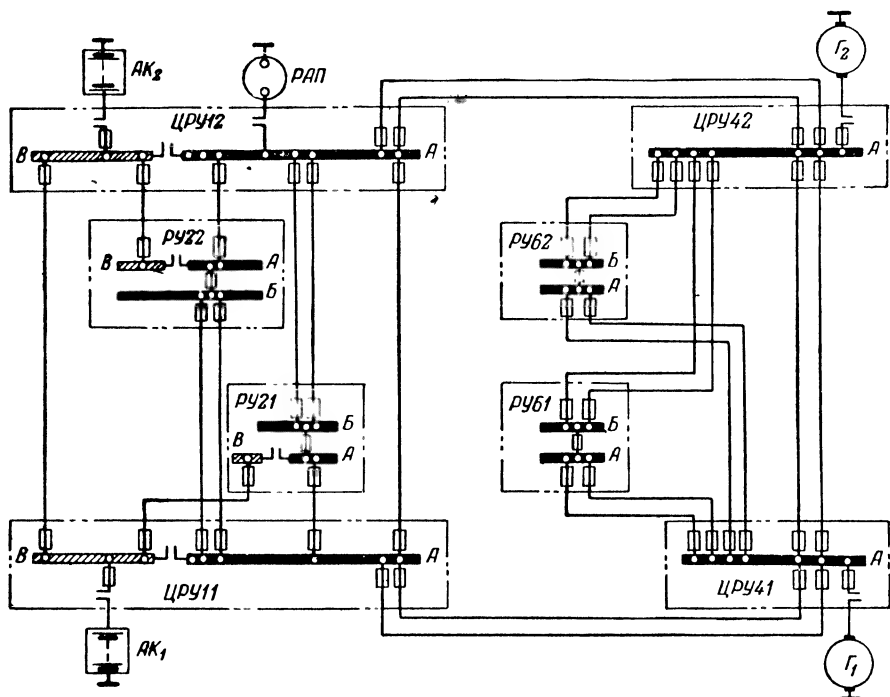


Рис. 5.7. Схема энергосистемы постоянного тока с кольцевой многоканальной защищенной питательной сетью с двумя генераторами

На рис. 5.7 представлена принципиальная схема энергосистемы постоянного тока с кольцевой многоканальной защищенной питательной сетью с двумя стартер-генераторами. Принцип построения сети аналогичен рассмотренным. Первичные шины ЦРУ11 и ЦРУ12 секционированы и подключены к общей сети. В аварийном режиме шины В автоматически или вручную отключаются контакторами от шин А, при этом аккумуляторы будут питать только аварийные шины. Сеть с успехом может применяться для летательных аппаратов с одним и двумя двигателями.

На рис. 5.8 изображена принципиальная схема энергосистемы постоянного тока с кольцевой многоканальной защищенной питательной сетью с двумя стартер-генераторами и резервированием аварийной сети. Сеть аналогична показанной на рис. 5.7. Для пи-

тания аварийных шин в аварийном режиме используются резервные провода, что приводит к увеличению веса сети, поэтому применение резервирования допускается для летательных аппаратов, имеющих особые специфические условия эксплуатации.

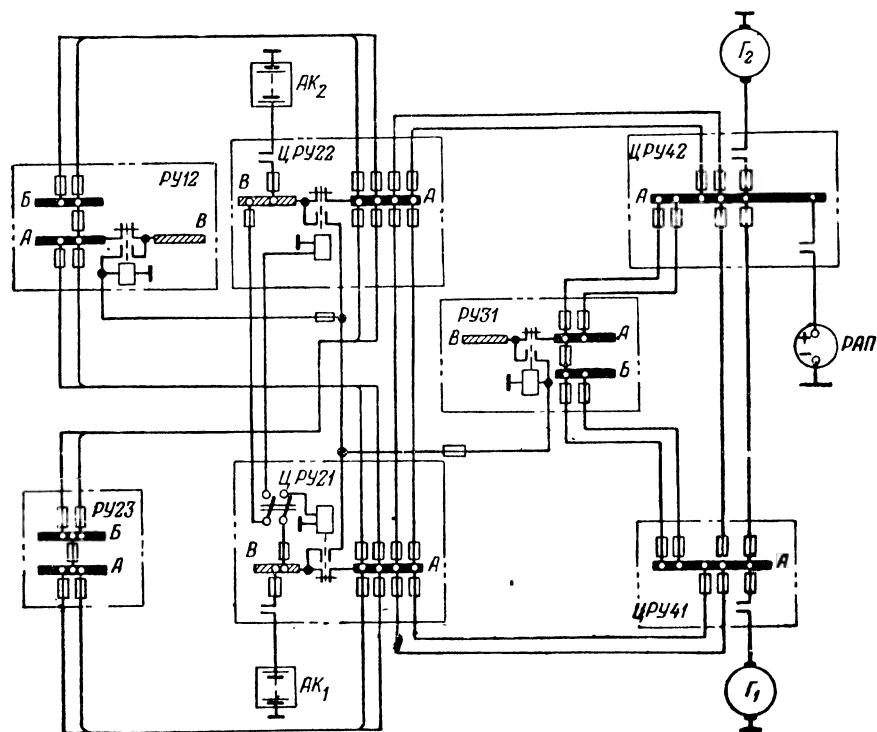


Рис. 5.8. Схема энергосистемы постоянного тока с кольцевой многоканальной защищенной питательной сетью с резервированием аварийной сети

В кольцевых схемах для питания шин вторичных распределительных устройств, обслуживающих вспомогательные потребители, допускается применение радиальных защищенных питательных сетей.

Кольцевые многоканальные защищенные питательные сети, как уже отмечалось, обеспечивают самую высокую надежность и живучесть в нормальных и аварийных режимах работы энергосистемы и наиболее перспективны для вновь проектируемых летательных аппаратов.

*Глава I***ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭНЕРГОСИСТЕМАХ
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА****§ 1. ОСОБЕННОСТИ СИСТЕМ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

Непрерывный рост скорости и высотности полета, увеличение мощности и изменение характера работы потребителей вызывает необходимость применения переменного тока в качестве основного вида электрической энергии в первичных системах энергоснабжения. Анализ систем электрооборудования летательных аппаратов показывает, что около 95% потребителей электрической энергии может работать на переменном токе.

Применение переменного тока напряжением 200/115 в по сравнению с постоянным током напряжением 27 в дает ряд преимуществ:

1. Уменьшается до 30% вес электрооборудования на л. а. за счет упрощения конструкции, уменьшения габаритов и веса генераторов, преобразователей, сети, части потребителей и системы охлаждения.

2. Повышается надежность и качество электропитания потребителей за счет: отсутствия коллекторов и контактных колец у генераторов и электродвигателей, устранения вращающихся преобразователей для питания радиоэлектронной и навигационной аппаратуры, увеличения высотности, уменьшения общего количества регуляторов и повышения точности регулирования.

3. Повышаются технико-экономические показатели за счет увеличения срока службы, срока регламентных работ и уменьшения веса.

4. Повышается предельная мощность генераторов.

5. Повышается напряжение, что позволяет снизить вес сети и упростить преобразование для получения оптимального напряжения потребителей.

6. Упрощается преобразование энергии из переменного тока в постоянный благодаря применению полупроводниковых выпрямителей, что повышает надежность вторичных энергетических систем. При этом мощность преобразования в постоянный ток не превышает 5% от установленной мощности переменного тока и осуществляется с высоким к. п. д. (0,8—0,9), тогда как в системе постоянного тока в переменный преобразуется около 20—30% мощности электромашинными преобразователями с низким к. п. д. (0,5).

7. Уменьшается величина токов короткого замыкания в сравнении с установками постоянного тока той же мощности.

8. Снижается уровень помех радиоприему из-за отсутствия котлиторных устройств.

Система переменного тока имеет и ряд недостатков:

1. В зависимости от режима работы авиадвигателя скорость вращения генератора изменяется в пределах 1:3, что приводит к изменению частоты в тех же пределах. Электрическая энергия нестабильной частоты не удовлетворяет всех потребителей.

2. Для получения переменного тока стабильной частоты необходимы приводы постоянной скорости, устанавливаемые между авиадвигателями и генераторами и обеспечивающие постоянство скорости вращения генераторов. Наличие промежуточного элемента приводит к увеличению веса и снижению надежности системы.

3. Невозможность обеспечения параллельной работы генераторов, приводимых во вращение непосредственно от авиадвигателей.

4. Трудность включения генераторов на параллельную работу и сохранения ее в связи с необходимостью строгого соблюдения равенства скоростей вращения, совпадения фаз и величин напряжений генераторов.

5. Равномерное распределение активных мощностей между параллельно работающими генераторами возможно только путем воздействия на привод генератора, т. е. регулированием их механической мощности.

6. Трудности регулирования скорости вращения асинхронных двигателей.

Таким образом, несмотря на некоторые недостатки, переменный ток напряжением 200/115 в по надежности и весу имеет безусловные преимущества перед постоянным током напряжением 27 в.

§ 2. ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ЭНЕРГОСИСТЕМАМ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Технические требования к системам электроснабжения, электрическим сетям и энергосистемам постоянного тока, почти полностью распространяются на энергосистемы переменного тока.

Отметим некоторые конкретные особенности:

1. Форма кривой напряжения должна отличаться от синусоиды не более 5%.

2. Коэффициент полезного действия должен быть максимальным на эксплуатационном режиме.

3. Полное сопротивление генератора току обратной последовательности должно быть не более 0,2 д. е.

4. Для уверенного срабатывания защиты ток короткого замыкания должен быть: однофазный — не менее $4I_{ном}$, а симметричный трехфазный — не менее $3I_{ном}$.

5. Точность поддержания частоты при изменении нагрузки от нуля до номинальной с приводом без корректора $\pm (1-2) \%$ и с корректором $\pm (0,1-1) \%$.

6. Неравномерность распределения активной и реактивной нагрузок между параллельно работающими генераторами должна быть не более 5% от номинальной одного генератора.

7. Точность поддержания напряжения при изменении симметричной нагрузки от нуля до номинальной $\pm 1-2 \%$.

8. Неравномерность загрузки фаз генератора не должна превышать мощности фазы, при этом отклонения напряжений отдельных фаз друг от друга не более 3%.

9. Аппаратура управления должна обеспечивать ручное включение автоматики при раздельной и параллельной работе генераторов, автоматическую синхронизацию и отключение генераторов при выходе их из синхронизма и всех видах неисправностей.

10. Аппаратура защиты должна обеспечивать защиту энергосистемы:

а) от повышения напряжения выше 225 ± 5 в с обратной зависимой вольт-секундной характеристикой;

б) от снижения напряжения ниже 180 ± 5 в с выдержкой $2 \pm 0,5$ сек;

в) при отклонении частоты на $\pm 15 \%$ от номинала с выдержкой 5 сек;

г) от перевозбуждения и недовозбуждения;

д) от всех видов коротких замыканий внутри генератора или его фидера без выдержки времени. Защита не должна срабатывать при эквизном токе к. з. до $6I_{ном}$;

е) при всех видах коротких замыканий в магистралях или распределительных шинах питательной сети с обратной зависимой вольт-секундной характеристикой;

ж) при перегрузках генератора в случае неравномерного распределения активных или реактивных мощностей;

з) при переходе генератора в двигательный режим вследствие снижения скорости вращения привода;

и) при отклонениях скорости вращения привода свыше допустимых.

11. Должна предусматриваться аппаратура контроля: вольтметр, частотомер и ваттметры, нормально показывающие активную мощность, а при нажатии кнопки — реактивную мощность, а также указатели давления и температуры гидросмеси или воздуха, используемых для питания привода постоянной скорости.

12. Аппаратура сигнализации должна выдавать сигнал на лампу «Отказ генератора» при срабатывании любого вида защиты и на лампу «Непараллельная работа» при выходе генератора из синхронизма.

Допуски на отдельные параметры даны ориентировочно и должны уточняться при разработке конкретной системы.

§ 3. ВЫБОР ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Преимущества применения системы энергоснабжения переменного тока в значительной мере обусловлены правильностью выбора ее основных параметров: числа фаз и их соединения, напряжения и частоты.

Число фаз

При переходе к единой первичной энергосистеме переменного тока потребители (особенно мощностью свыше 0,5 кВа) должны выполняться трехфазными, так как они обеспечивают равномерную загрузку фаз и снижение степени несимметрии фазных и линейных напряжений.

В трехфазной системе степень несимметрии ε характеризуется отношением напряжения обратной последовательности U_2 к напряжению прямой последовательности U_1 и не должна превышать 4%, т. е.

$$\varepsilon = \frac{U_2}{U_1} \cdot 100\% \leq 4\%.$$

Степень несимметрии напряжений зависит от сопротивления генератора току обратной последовательности, а также сопротивления и характера нагрузки, имея максимальное значение для емкостной нагрузки и минимальное для индуктивной.

На рис. 1.1 представлена зависимость степени несимметрии напряжений трехфазного генератора от сопротивления его току обратной последовательности для различных однофазных нагрузок (100, 67, 50 и 25% от номинальной мощности фазы).

Из графика видно, что ограничения степени несимметрии напряжений соответственно ограничивают величину сопротивления току обратной последовательности. Практически z_2 выбирают не более 0,2 д. е.

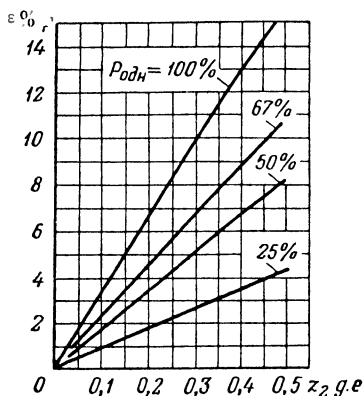


Рис. 1.1. Зависимость степени несимметрии от z_2 для различных однофазных нагрузок

Увеличение несимметрии напряжений более 4% вызывает у асинхронных двигателей появление обратно вращающегося поля, и как следствие снижение вращающего момента на валу двигателей, увеличение потерь и ухудшение энергетических показателей.

Длительная работа трехфазных генераторов при несимметричной нагрузке допускается, если токи в фазах не превышают номинального значения, а их разность не превышает 10—20% номинального тока фазы.

Мощность потребителей трехфазного тока составляет около 90% от установленной мощности потребителей. Оставшиеся мелкие однофазные потребители должны равномерно распределяться по фазам с учетом одновременности их включения. Это позволит практически сохранить симметрию фазных напряжений и тем самым обеспечить высокое качество энергоснабжения потребителей.

Число потребителей трехфазного тока значительно возрастает за счет применения трехфазных электродвигателей, имеющих при одинаковой мощности лучшие весовые и энергетические показатели по сравнению с однофазными.

В качестве основной системы переменного тока целесообразно принять трехфазную с заземленной силовой нейтралью. В этом случае однофазные потребители могут подключаться на линейное или фазное напряжения.

Напряжение

При выборе величины номинального напряжения и его допуска необходимо учитывать ряд факторов:

1. Протяженность сети и величину передаваемой мощности.
2. Напряжение питания потребителей. Для большинства потребителей наиболее рационально напряжение 200 в, для некоторых 115 в и лишь для незначительного количества потребителей (около 2% от общей мощности) напряжения 15, 27, 36 в и др.
3. Надежность работы системы в условиях сверхзвуковых и высотных полетов. Повышение напряжения переменного тока до 200 в практически не ухудшает условия коммутации и дугогашения в сравнении с постоянным током.
4. Безопасность системы для обслуживающего персонала. Безопасным считается напряжение постоянного тока не выше 27 в, а для переменного тока частотой 400—2000 гц — не выше 40 в. Поэтому с применением переменного тока напряжением 200/115 в должно использоваться дистанционное управление с напряжением на пультах управления не выше 27—30 в.
5. Вес генераторов, коммутационной и распределительной аппаратуры.
6. Величину токов короткого замыкания.
7. Качество и потери энергии.

В настоящее время при всех условиях эксплуатации генераторы переменного тока обеспечивают изменение напряжения в преде-

лах $\pm 2\%$ от номинального. Однако из соображений повышения качества энергоснабжения и минимальных потерь в сети этот допуск желательно довести до величины не выше $\pm 1\%$.

Номинальное напряжение на зажимах потребителей $U_{п.ном}$ и допуск на это напряжение определяется номинальным напряжением генератора $U_{г.ном}$, допуском на его напряжение $\pm \Delta U_g$ и потерей напряжения в сети ΔU_c

$$U_{п.ном} = U_{г.ном} \pm \Delta U_g - \Delta U_c.$$

Максимальное напряжение на зажимах потребителей возможно при верхнем допуске напряжения генератора ($+\Delta U_g$) и подключении потребителей к точке присоединения регулятора напряжения ($\Delta U_c = 0$):

$$U_{п.макс} = U_{г.ном} + \Delta U_g,$$

а минимальное напряжение — при нижнем допуске напряжения генератора ($-\Delta U_g$), подключении потребителей в точке, максимальной удаленной от точки присоединения регулятора напряжения, и при максимальной мощности нагрузки, включенной в рассматриваемой магистрали ($\Delta U_c = \Delta U_{c.макс}$):

$$U_{п.мин} = U_{г.ном} - \Delta U_g - \Delta U_{c.макс}.$$

Допуски на колебание напряжения у зажимов потребителей определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} +\Delta U_{п} &= U_{п.макс} - U_{п.ном} = U_{г.ном} + \Delta U_g - U_{п.ном}; \\ -\Delta U_{п} &= U_{п.мин} - U_{п.ном} = U_{г.ном} - \Delta U_g - \Delta U_{c.макс} - U_{п.ном}. \end{aligned}$$

Исходя из опыта в системе трехфазного переменного тока с заземленной силовой нейтралью за номинальное напряжение принято: у генераторов 208/120 в $\pm 2-1\%$ и у потребителей 200/115 в $\pm \pm 5\%$, как наиболее удачно отвечающие на совокупность всех требований по весу сети, электрических машин, электрической прочности изоляции, надежности и безопасности эксплуатации.

Напряжения 36, 28, 15 в и другие получаются из основного напряжения с помощью трансформаторов или автотрансформаторов. Для повышения качества выходного напряжения трансформаторы следует подключать к шинам, с которых получают питание чувствительные элементы регуляторов напряжения.

Частота

Габариты, вес и технические характеристики большинства элементов электрических систем в значительной степени зависят от частоты переменного тока. Для каждого элемента существует оптимальное значение частоты.

Однако индивидуальное преобразование частоты может быть достигнуто только с помощью сложных, тяжелых и громоздких

вращающихся машин или ферромагнитных умножителей частоты. Поэтому более рационально иметь единую частоту, оптимальную для всей системы переменного тока.

В качестве критерия для выбора оптимальной частоты энергосистемы может быть принят минимум веса отдельных элементов и всего электрооборудования летательных аппаратов.

Основными элементами являются: электрические машины, силовые трансформаторы, радиооборудование и провода бортсети. Рассмотрим влияние частоты на вес отдельных агрегатов.

Генераторы с электромагнитным возбуждением имеют оптимальную частоту 300—500 гц, а возбуждаемые постоянными магнитами — около 800 гц [1].

Следует отметить, что при изменении частоты на одну и ту же величину вес изменяется различно в зависимости от скорости вращения генератора.

Электромеханизмы являются наиболее крупными потребителями электрической энергии и в общем весе электрооборудования занимают значительное место. Но они, как правило, работают в кратковременном режиме.

Наиболее многочисленны и ответственны электромеханизмы вращательного типа. Механизмы, управляющие жизненно важными органами, выполнены с повышенной надежностью за счет применения двух электродвигателей, работающих параллельно на один редуктор. При выходе из строя одного двигателя второй успешно выполняет все функции при уменьшенной скорости вращения выходного вала механизма, используя имеющийся в редукторе дифференциал. К таким агрегатам относятся механизмы управления закрылками, стабилизатором, шасси и ряд других. Вес двух двигателей в общем весе всего механизма составляет 50—55%.

Наибольшее снижение веса при частоте 400 гц и скорости вращения 8000—12 000 об/мин составляет в среднем около 30% в сравнении с постоянным током.

Повышение частоты выше 400 гц ведет к значительному увеличению веса, снижению к. п. д. и cos ϕ .

Сказанное относится и к электродвигателям с длительным режимом работы.

Таким образом для электродвигателей, работающих при скорости вращения 8000—12 000 об/мин, оптимальной является частота 400 гц.

У трансформаторов вес и габариты с повышением частоты снижаются. При изменении частоты с 400 до 2000 гц вес маломощных трансформаторов снижается в 2 раза, а силовых — в 1,3 раза, так как последние выполняются с большими нагрузками на активные материалы, чем маломощные.

На повышенной частоте несколько увеличивается к. п. д. трансформатора (до 10% при 2000 гц), так как уменьшение размеров, несмотря на увеличение удельных потерь в железе, приводит к

снижению потерь в меди и железе. Уменьшается индуктивность рассеяния и повышается стабильность выходных напряжений.

Радио- и радиолокационное оборудование. Изменение частоты влияет на электродвигатели, потенциометры, вращающиеся трансформаторы, реле, силовые трансформаторы, конденсаторы, дроссели фильтров и ряд других элементов. Наибольший вес среди них имеют силовые трансформаторы.

У вращающихся трансформаторов изменение частоты с 400 на 2000 *гц* увеличивает погрешность в воспроизведении синусо-косинусного закона и изменение сдвига фаз. Поэтому, несмотря на возможность уменьшения веса и габаритов вращающихся трансформаторов, перевод их на повышенную частоту нецелесообразен.

Сглаживающие фильтры блоков питания и дросселей, состоящие из *L* и *C* — элементов, с увеличением частоты снижают вес.

Таким образом, при повышении частоты незначительный выигрыш в весе радиооборудования за счет трансформаторов и фильтров существенно ухудшает выходные параметры, определяющие качество его работы. Следовательно, целесообразно сохранить частоту 400 *гц*.

Для приборов и автоматики, куда входят гироскопические устройства, магнитные усилители, потенциометры, вращающиеся трансформаторы, счетно-решающие устройства, емкостные и индуктивные датчики, реле, электродвигатели малой мощности, работающие в следящих системах, как показано выше, повышение частоты более 400 *гц* нецелесообразно.

Магнитные усилители с увеличением частоты подобно трансформаторам значительно снижают габариты и вес.

При частоте 400 *гц* они имеют значительный вес — примерно 100—150 *г* на 1 *вт* выходной мощности. Повышение частоты приводит также к уменьшению постоянной времени усилителя. Питание магнитных усилителей целесообразно выполнять от основной сети через умножители частоты. В целом приборное оборудование и автоматика при переводе их на повышенную частоту будут иметь тот же вес, что и на частоте 400 *гц*.

Коммутационная аппаратура. Изменение частоты переменного тока влияет на процесс гашения дуги на контактах аппарата. Время горения дуги в диапазоне частот 400—600 *гц* минимальное. В этой области частот нарастание напряжения на контактах после погасания дуги происходит медленнее, чем восстановление электрической прочности воздуха в дуговом промежутке, поэтому, погаснув при первом прохождении напряжения через нуль, дуга больше не возникает.

Оптимальная частота для работы коммутационной аппаратуры 300÷600 *гц*.

Провода бортовой сети. С увеличением частоты переменного тока увеличивается активное сопротивление проводов вследствие вытеснения тока.

Это приводит к увеличению потерь напряжения в проводах и соответственно к увеличению веса сети.

Провода сечением до 10 мм^2 допускают значительное увеличение частоты без заметного увеличения сопротивлений, а провода сечением $50\text{—}95 \text{ мм}^2$ уже на частоте 400 гц увеличивают сопротивление до $10\text{—}15\%$.

Примерный график изменения веса основных элементов и всего электрооборудования в зависимости от частоты представлен на рис. 1. 2.

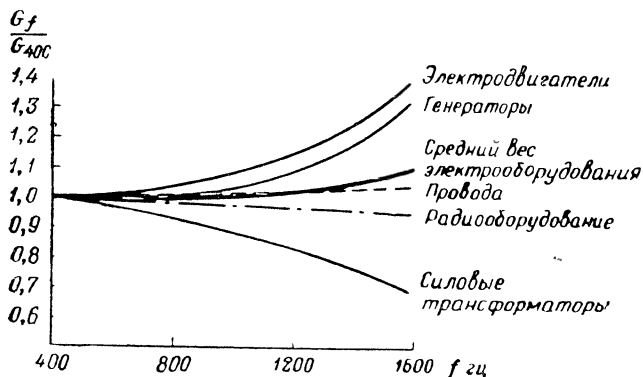


Рис. 1. 2. График изменения веса электрооборудования в зависимости от частоты

Точность стабилизации частоты. Потребители по требуемой для их работы точности стабилизации частоты можно разбить на четыре группы.

1. Потребители, безразличные к стабилизации частоты, — пропивооблденительные устройства, обогрев аппаратуры, бытовое оборудование, освещение и им подобные виды электрооборудования.

2. Потребители, допускающие грубую стабилизацию частоты в пределах $\pm 5\text{—}10\%$. К ним относятся радиосвязное и радиолокационное оборудование по основной мощности, потребляемой им.

3. Потребители, требующие точной стабилизации частоты, — примерно $\pm 1\text{—}2\%$. К ним относятся всевозможные автоматические, регулирующие и счетно-решающие устройства, навигационные приборы и другая аппаратура, для которых точность стабилизации частоты хуже, чем $\pm 1\text{—}2\%$, неприемлема вследствие увеличения разброса их выходных параметров.

Точность стабилизации частоты не хуже, чем $\pm 1\%$, необходима также для синхронизации параллельно работающих генераторов.

4. Потребители, требующие прецизионной точности стабилизации частоты, — примерно $0,05\text{—}0,005\%$. Это в основном навигационные и счетно-решающие устройства, имеющие элементы, с помощью которых требуется с большой точностью синхронизировать вращение,

выполнять операции интегрирования или дифференцирования, как, например, синхронные двигатели в астронавигационных системах, ведущие счет времени и расстояния. Ввиду достаточной длительности их работы ошибка интегрирования при неточной стабилизации частоты значительно возрастает. Количество таких устройств невелико, а потребляемая ими мощность мала.

Таким образом, для получения оптимальных параметров веса и надежности работы всего электрооборудования в основной энергосистеме переменного тока за номинальную следует принять частоту 400 гц с точностью стабилизации $\pm 1\%$.

Потребители, требующие прецизионной точности стабилизации частоты (0,05—0,005% гц), должны получать питание от специальных преобразователей.

Выводы

В первичной энергосистеме переменного тока целесообразно принять следующие основные параметры:

1. Трехфазную систему с заземленной силовой нейтралью.
2. Напряжение генераторов 208/120 в $\pm (1-2\%)$.
3. Напряжение потребителей 200/115 в $\pm 5\%$.
4. Частоту 400 гц $\pm (0,1-1)\%$.
5. Потребители мощностью более 0,5 ква целесообразно выполнять трехфазными.

При этом однофазные потребители напряжением 115 в питаются от основной сети с использованием силовой нейтрали. Потребители напряжением, отличающимся от основного, питаются через трансформаторы. Потребители прецизионной частоты питаются от специальных преобразователей.

§ 4. КЛАССИФИКАЦИЯ ГЕНЕРАТОРОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Генераторы переменного тока классифицируются на: синхронные с электромагнитным возбуждением, магнитоэлектрические с возбуждением от постоянных магнитов и индукторные с электромагнитным возбуждением или с возбуждением от постоянных магнитов.

Синхронные генераторы с электромагнитным возбуждением выполняются, как правило, с внутренними явно выраженными полюсами и являются основными источниками энергии в первичных и вторичных энергосистемах.

Магнитоэлектрические генераторы находят применение в качестве возбудителей синхронных генераторов и генераторов преобразователей во вторичных энергосистемах. Их основное достоинство — это высокая надежность, простота конструкции и обслуживания (благодаря отсутствию скользящих контактов, щеток и вращающейся обмотки возбуждения), автономность и высокий к. п. д. (благодаря отсутствию потерь на возбуждение и в скользящих контактах).

Индукторные генераторы применяются главным образом в преобразователях типа МА.

Синхронный бесконтактный генератор с самовозбуждением. В последние годы для бортовых энергетических систем были разработаны бесконтактные генераторы переменного тока, включающие три основных элемента: подвозбудитель, возбудитель и генератор. Возможный вариант принципиальной схемы бесконтактного генератора переменного тока приведен на рис. 1.3.

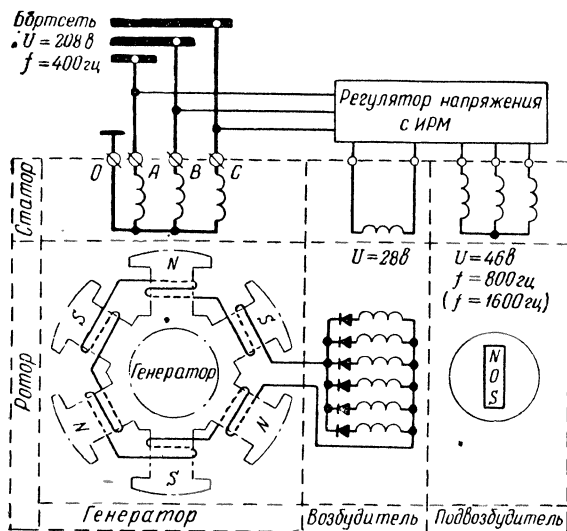


Рис. 1.3. Схема бесконтактного синхронного генератора с самовозбуждением

Подвозбудитель представляет собой машину с возбуждением от постоянных магнитов, которые расположены на роторе. Подвозбудитель генерирует небольшую однофазную (или трехфазную) мощность с частотой 1600 Гц (или 800 Гц), которая используется для питания аппаратуры управления, регулирования и защиты.

Обмотка возбуждения возбудителя расположена в статоре и получает питание от подвозбудителя через выпрямитель.

Ротор возбудителя имеет многофазную обмотку, соединенную через кремниевые выпрямители с вращающимися обмотками возбуждения главного генератора.

Энергия переменного тока частотой 400 Гц снимается с обмоток главного генератора, расположенных в статоре. Бесконтактный генератор не имеет контактных колец и щеток.

Описанная система возбуждения придает характеристикам генератора исключительно высокую стабильность, а использование

Основные технические данные трех

Тип генера- тора	Номинальные данные								Вес, кг	$G/P_{ном}$, кг/кВа
	мощность $P_{ном}$, кВа	напряжение U , В	ток I , а	скорость n об/мин. 103	частота Гц	$\cos \varphi$	Возбу- ждение			
							U в	I а		
СГС30У	30,0	120	144	$8,0 \pm 2\%$	$400 \pm 2\%$	0,85	$26 \div 30$	29,0	39,0	1,3
ГТ30ПЧ8	30,0	$208 \pm 3\%$	83,5	$7,0 \div 9,2$	$350 \div 460$	0,85		15,0	38,0	1,26
СГС30Б	30,0	$208 \pm 6\%$	83,5	$4,2 \div 9,3$	$210 \div 465$	0,8	$26 \div 30$	55,0	30,0	1,00
СГС30-8	30,0	$208 \pm 3\%$	83,5	$5,5 \div 8,7$	$368 \div 580$	0,85	$26 \div 30$	40,0	40,0	1,33
ТГС30-4	30,0	$208 \pm 3\%$	83,5	$12,0 \pm 5\%$	$400 \pm 5\%$	0,8	$26 \div 30$	26,0	35,0	1,16
СГС40У	40,0	208	111	$7,75 \div 8,35$	$387 \div 417$	0,9	$26 \div 30$	29,0	39,0	0,97
ГТ40ПЧ8	40,0	$208 \pm 2\%$	111	$8,0 \pm 2\%$	$400 \pm 2\%$ ***	0,8	Само- возбуж- дение		47,0	1,17
СГС40П	40,0	208	111	$7,5 \div 8,9$	$375 \div 445$	0,8	$26 \div 30$	29,0	40,0	1,00
ГТ60ПЧ8АТВ	60,0	$208 \pm 2\%$	167	$8,0 \pm 2\%$	$400 \pm 2\%$ **	0,8	Само- возбуж- дение		55,0	0,91
СГС90/360	75,0	360	120	$7,5 \div 9,0$	$375 \div 450$	0,9			62,0	0,83

* Звезда с нулевым проводом.

** Загрузка нулевого провода не более 5% от номинальной мощности

*** $\pm 1\%$ с системой точного регулирования частоты.

фазных генераторов переменного тока

Высотность H , км	Расход и давление воздуха, $\text{дм}^3/\text{сек}$ и мм вод. ст.	Габариты		Число полюсов	Соединение обмоток	Регулирующая аппаратура				
		диаметр, мм	длина, мм			регуляторы на-пряжения	коробки управления и регулирова-ния	точное регулирование напря-жения	защита от пере-напряжения	выносное со-противле-ние
—	235/400	198	443	6	Δ	РН-600	КРЛ-33А			ВС-34
18	/400	217	423	6	λ^*	КСВ-1	КВР-8			ВС-33А
—	/400	182	422	6	λ^*	РН-600	КРЛ-26БМ			ВС-30Б
16	200/400	216	452	8	λ^*	РН-600	КВР-3-2			ВС-33А
15	/400	206	472	4	λ^{**}	РН-600	КВР-3-2			ВС-33А
5,5	/400	198	443	6	λ^*	РН-600	КВР-3-2			ВС-33А
14	245/	257	420	6	λ^*	БРН-62	БРЧ-62; БТТ-62; БЗУ-62			—
15	160/360	198	465	6	λ^*	РН-600	КВР-3-2			ВС-33А
15		258	452	6	λ^*	БРН-62	БРЧ-62; БТТ-62; БЗУ-62			—
	300/	235	550	6	λ^*	РН-600	КРЛ-33А			ВС-34

генератора

подвозбудителя и возбудителя позволяет выбрать оптимальную рабочую частоту стабилизатора и значительно сократить длительность переходных процессов во всей системе.

Основные технические данные трехфазных генераторов переменного тока приведены в табл. 1.1.

Глава II

ПРИВОДЫ ПОСТОЯННОЙ СКОРОСТИ

§ 1. КЛАССИФИКАЦИЯ И ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ПРИВОДАМ ПОСТОЯННОЙ СКОРОСТИ

В зависимости от режима полета скорость вращения авиадвигателей изменяется в широких пределах (у ТВД 1—1,3 у ТРД 1—2,8). При этом скорость генератора, получающего вращение от авиадвигателя через обычный механический редуктор, изменяется в тех же пределах.

Скорость вращения генератора стабилизируется с помощью привода постоянной скорости (ППС), являющегося связующим звеном между генератором и авиадвигателем и плавно регулирующего передаточное отношение от авиадвигателя к генератору.

Приводы постоянной скорости по принципу действия классифицируются на механические, гидравлические, пневматические и электрические, а по разветвленности потока энергии, передаваемой от авиадвигателя к генератору, — на простые и дифференциальные.

В простом приводе вся энергия, отбираемая от первичного двигателя, предварительно качественно преобразуется и передается только в одном направлении — от первичного двигателя к генератору.

В дифференциальном приводе механическая энергия, отбираемая от первичного двигателя, передается к генератору двумя путями: непосредственно без преобразования через механический редуктор с высоким к. п. д. и с качественным преобразованием через регулирующий орган. Эта часть энергии может изменяться как по величине, так и по направлению. В качестве регулируемого потока энергии может использоваться механическая энергия, преобразованная в гидравлическую или электрическую, а также сжатый воздух, отбираемый от компрессора авиадвигателя.

Общие уравнения для дифференциального привода

$$P = P_m \pm P_p;$$

$$n = n_m \pm n_p,$$

где P_m и n_m — мощность и скорость вращения на входе в дифференциал на валу механической передачи;

P_p и n_p — мощность и скорость вращения на входе в дифференциал на валу регулирующего органа;

P и n — мощность и скорость вращения на валу генератора.

Целесообразность применения того или иного типа привода (в простом или дифференциальном исполнении) зависит от ряда факторов: диапазона скорости вращения и системы запуска авиадвигателей, мощности и места установки генераторов, системы электроснабжения и других.

В технических требованиях на привод отражаются: тип и виды энергии для вращения и регулирования, принцип регулирования, основные свойства и технические данные, виды контроля, защиты и сигнализации при нормальных и аварийных режимах работы.

Основные свойства привода

1. Мощность должна быть соизмерима с мощностью генератора.
2. Перегрузочная способность должна соответствовать перегрузочной способности генератора.
3. Нагрузочная характеристика должна быть падающей, начиная с величины максимально допустимой перегрузки генератора.
4. Передаточное отношение должно быть плавно регулируемым.
5. Привод должен обеспечивать распределение активной мощности между параллельно работающими генераторами пропорционально их номинальным мощностям.

Основные технические данные

1. Привод должен обеспечивать постоянство скорости вращения при раздельной и параллельной работе генераторов на всех режимах работы авиадвигателей, начиная с малого газа и кончая взлетным режимом.

2. На всех режимах, начиная с режима малого газа, привод должен обеспечивать снятие мощности с генератора

100% — длительно;

150% — в течение 5 мин;

200% — в течение 5 сек.

3. Регулятор привода должен поддерживать постоянную скорость вращения генератора переменного тока с точностью $\pm 2\%$ без корректора и не хуже $\pm 1\%$ с корректором.

4. Длительность переходных процессов при включении или сбросе номинальной нагрузки не более 0,5–1,5 сек.

5. Коэффициент полезного действия должен иметь максимальное значение на крейсерском режиме.

6. Система управления и регулирования должна быть рассчитана на нормальное напряжение 27 в, сохранять работоспособность при включении на 16 в и удерживаться во включенном состоянии при напряжении 8 в.

7. Вес — не более 0,7–1,2 кг/кв. без учета дополнительного веса топлива и системы охлаждения.

8. Дополнительный расход горючего авиадвигателем — не более 0,1–0,2 кг/кв. час.

9. Полетный вес — не более 2 кг/кв.

Защита и сигнализация при аварийных режимах

1. Автоматическое отключение привода при скорости вращения генератора или регулирующего органа выше или ниже допустимой.
2. Автоматическое устройство, исключающее возможность передачи момента от генератора к авиадвигателю.
3. Автоматическое отсоединение от авиадвигателей при заклинивании привода или генератора.
4. Автоматическая сигнализация о возникновении опасных режимов (превышение допустимых температур, давления и т. д.)

§ 2. АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ПРИВОДА

Система автоматического регулирования скорости вращения привода обеспечивает постоянную скорость генератора при изменении скорости вращения авиадвигателя, необходимую мощность привода при изменении нагрузки генератора и равномерное распределение активной мощности между параллельно работающими генераторами.

Регулирование по скорости и мощности выполняет регулятор скорости, чувствительный элемент которого реагирует на отклонение скорости вращения от частоты тока генератора от номинальных и с помощью сервомеханизма воздействует на режим работы привода. В качестве основного чувствительного элемента регулятора могут применяться центробежные датчики или тахогенераторы.

На рис. 2.1 показан один из вариантов регулятора скорости, чувствительным элементом кото-

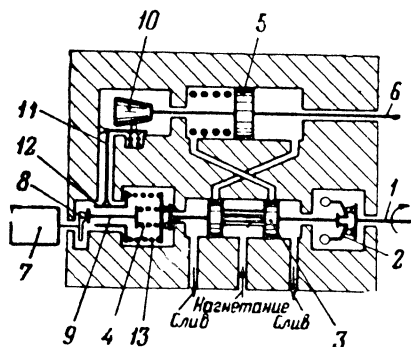


Рис. 2.1. Регулятор скорости с коррекционным электромеханизмом:

1—входной вал; 2—центробежный регулятор; 3—золотник; 4—пружина корректора; 5—сервопоршень; 6—шток регулирующей заслонки; 7—корректор; 8—кулачок; 9—шток корректора; 10—конус; 11—рычаг; 12—втулка; 13—пружина

рого является центробежный датчик 2, вращающийся через входной вал 1 со скоростью, пропорциональной скорости генератора. Центробежная сила, действующая на грузики, передается на золотник 3, толкая его влево, и уравнивается пружинами 4 и 13. В полость между поясками золотника 3 от нагнетающей ступени маслососа, под давлением подведено масло. Рассмотрим работу регулятора на примере пневмомеханического ППС.

При номинальной скорости генератора золотник 3 находится в равновесном положении, закрывая своими поясками каналы, ведущие к обеим сторонам сервопоршня 5, связанного кинематически с регулирующей заслонкой 6 привода.

При увеличении скорости вращения генератора вследствие увеличения скорости двигателя (регулирование по скорости) или уменьшения нагрузки (регулирование по мощности) центробежный регулятор, преодолевая натяжение пружин 4 и 13, смещает золотник 3 влево, подводя давление масла к полости справа от сервопоршня 5 и соединяя левую полость со сливом. Сервопоршень 5, перемещаясь влево, прикрывает заслонку привода 6, уменьшая расход воздуха через турбину, в результате чего скорость вращения генератора уменьшается. Соответствующее уменьшение центробежной силы грузиков вызывает обратное перемещение золотника 3 до восстановления прежнего состояния равновесия при номинальной скорости генератора. При уменьшении скорости вращения генератора аналогичный процесс происходит в обратном направлении.

Для обеспечения устойчивости процесса регулирования имеется жесткая обратная связь, выполненная следующим образом. На штоке сервопоршня 5 неподвижно закреплен конус 10, к образующей которого с помощью пружины постоянно прижат шарик рычага 11. Другое плечо этого рычага связано со втулкой 12, поджимающей пружину 13 обратной связи. При перемещении сервопоршня 5 шарик рычага 11 скользит по конусу. Рычаг поворачивается, меняя натяжку пружины 13, и возвращает золотник 3 в равновесное положение, т. е. в режим восстановления равновесной скорости, но несколько отличной от первоначальной, так как натяжка пружин изменилась.

Для устранения «статической ошибки», обусловленной наличием обратной связи, и для параллельной работы нескольких генераторов на регуляторе установлено корректирующее устройство, управляемое электромеханизмом корректора 7, к которому подается сигнал от резонансных контуров, реагирующих на отклонение частоты и неравномерное распределение активных нагрузок между генераторами. Электромеханизм 7 по электрическому сигналу медленно поворачивает кулачок 8, толкающий шток 9, меняя при этом натяжку пружины 4 корректора и восстанавливая заданную скорость генератора.

При параллельной работе генераторов процесс регулирования по скорости или мощности протекает во всех приводах одновременно. Равномерное распределение активной мощности между генераторами и точное регулирование их частоты выполняет коррекционное устройство по сигналам измерителей частоты и активной мощности (см. раздел о параллельной работе генераторов).

На рис. 2.2 показан регулятор скорости с электромагнитным корректором. Рассмотрим его работу на примере гидравлического привода. Входной вал 1 вращается со скоростью, пропорциональной скорости вращения генератора. Центробежные грузы 2, вращающиеся с валом 1, двигают шток золотника 3, преодолевая силу пружины 4.

При номинальной скорости ППС силы центробежных грузов 2 уравниваются пружиной 4. Золотник 3 находится в равно-

весном положении, закрывая отверстие, ведущее к сервопоршню 5. Последний удерживает в определенном положении наклонную шайбу гидронасоса, обеспечивающую постоянную скорость вращения. Номинальная скорость устанавливается соответствующей за-тяжкой пружины 4 с помощью винта 8.

Если выходная скорость ППС уменьшается от точки равнове-сия, то центробежные силы грузов становятся меньше силы давлe-ния пружины и золотник перемещается вправо, обеспечивая пода-чу масла под давлением в левую полость сервомеханизма, который в свою очередь приводит к увеличению углового отклонения шай-

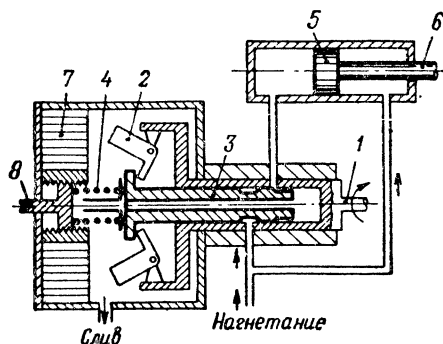


Рис. 2.2. Регулятор скорости с электро-магнитным корректором:

1—входной вал; 2—центробежный груз; 3—золотник; 4—пружина; 5—сервопоршень; 6—шток регулирующей заслонки (шайбы); 7—электромагнитный корректор; 8—регулировочный винт

мещается влево, уменьшая угловое отклонение шайбы насоса и выходную скорость привода. Дальнейший процесс регулирования аналогичен.

Центробежные грузы изготовлены из магнитотвердого материала и могут притягиваться или отталкиваться, уменьшая или увеличивая центробежную силу, согласно направлению и величине постоянного тока, проходящего через электромагнит 7. Напряже-ние на электромагните изменяется по сигналам измерителя актив-ной мощности, действующего в соответствии с отклонением актив-ной нагрузки от средней величины.

Из рассмотренных схем видно, что регулятор скорости управ-ляет соответствующим исполнительным элементом привода: в пнев-матических — заслонкой подачи воздуха к турбине; в гидравличе-ских — наклоном шайбы, определяющей производительность гид-ронасоса; в механических — углом установки роликов по отноше-нию к тороидам, определяющим передаточное отношение, и в элект-рических — изменением возбуждения.

§ 3. МЕХАНИЧЕСКИЕ ПРИВОДЫ ПОСТОЯННОЙ СКОРОСТИ

Механический привод постоянной скорости, получая переменную скорость вращения от авиадвигателя, преобразует ее в постоянную скорость на выходе с помощью фрикционных или зубчатых

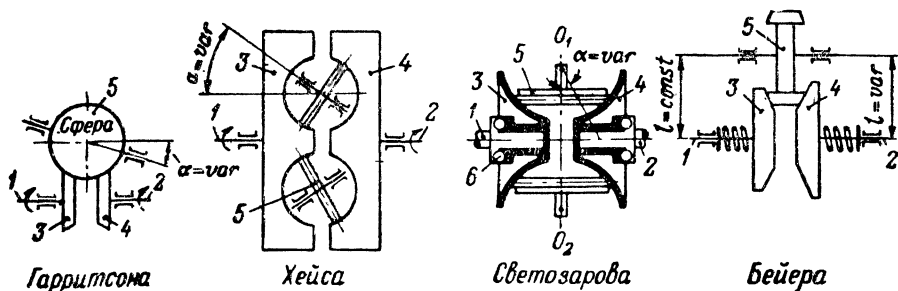


Рис. 2.3. Типовые схемы фрикционных механических приводов постоянной скорости:

1—входной вал; 2—выходной вал; 3—ведущий диск; 4—ведомый диск; 5—ролик; 6—шарик

тых вариаторов. Передается мощность силой трения между вращающимися элементами, удерживаемыми в контакте друг с другом.

На рис. 2.3 показаны некоторые типовые конструктивные схемы механических приводов постоянной скорости, принципы работы которых аналогичны.

В качестве примера рассмотрим конструктивную схему фрикционного механического привода, показанную на рис. 2.4. На веду-

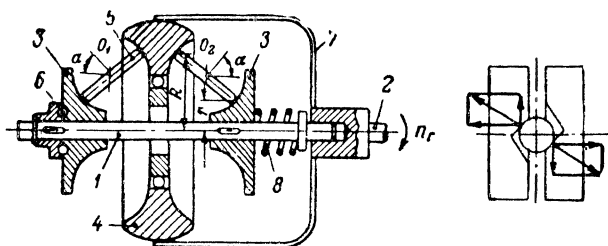


Рис. 2.4. Конструктивная схема фрикционного механического привода:

1—входной вал; 2—выходной вал; 3—ведущий диск; 4—ведомый диск; 5—ролик; 6—шарик; 7—чаша; 8—пружина

щем валу 1, получающем вращение от авиадвигателя, жестко закреплены ведущие диски 3. Ведомый диск 4 при помощи чаши 7 связан с валом 2 генератора. Рабочие поверхности дисков 3 и 4 представляют части поверхности торов и связаны между собой роликами 5. Три пары роликов расположены симметрично под углом

120° друг к другу. Двустороннее симметричное их размещение относительно диска 4 разгружает его подшипники от осевых усилий. Пружина 8 предварительно прижимает ролики 5 к дискам 3 и 4. Ведущий вал 1 связан с валом авиадвигателя при помощи шарикового устройства 6. Под действием крутящего момента шарики стремятся катиться по наклонным краям канавок (лунок), как показано на рис. 2.4, и, раздвигая шайбу и диск 3, автоматически прижимают ролики 5 к дискам 3 и 4 с усилием, пропорциональным передаваемым моментам.

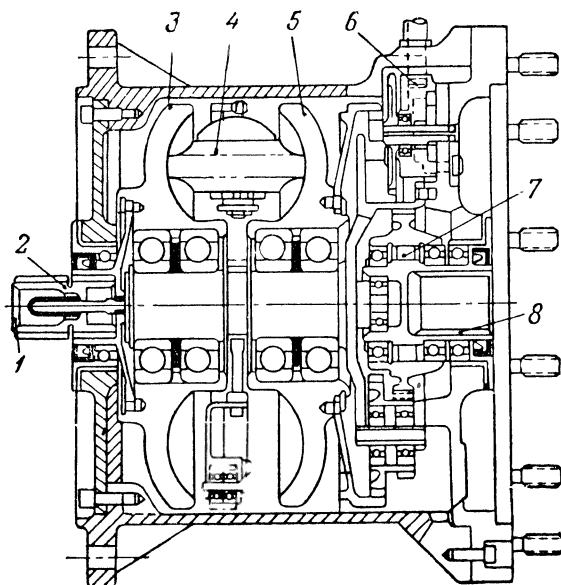


Рис. 2.5. Механический привод постоянной скорости:
1—вал, соединяемый с двигателем; 2—сечение вала, перерезаемое при превышении крутящего момента; 3—ведущий горюид; 4—ролик; 5—ведомый торюид; 6—масляный насос; 7—обгонная муфта; 8—шлицы выводного вала, соединяемого с генератором

Вращение с ведущих дисков 3 передается на ведомый диск 1 с помощью роликов 5. Отношение скоростей вращения n ведомого диска 4 и n_m ведущего 3 обратно пропорционально отношению радиусов касания роликов к соответствующим дискам:

$$\frac{n}{n_m} = \frac{r}{R}.$$

Коэффициент редукции плавно изменяется поворотом осей роликов относительно точек O_1 и O_2 , изменяющим радиусы касания роликов 5 с дисками 3 и 4.

На рис. 2.5 показана типовая конструкция механического привода, у которого передаточное отношение между входным и выход-

ным элементами определяется углом установки ролика по отношению к тороидам.

Тороиды прижаты к ролику центральным нагружающим болтом. Контактные напряжения между тороидами и роликом могут достигать $30\,000\text{ кг/см}^2$, что возможно только при использовании высококачественной стали, выплавляемой в вакууме. В приводах применяется специальная смазка, которая, с одной стороны, обеспечивает высокий коэффициент трения между роликом и тороидами, а с другой — хорошую смазку остальных деталей.

В механических приводах применяется электронная система регулирования, усиливающая электрический сигнал отклонения скорости вращения и действующая на электромагнитную муфту или сервомотор. Последние устанавливают ролик в новое положение под углом, необходимым для поддержания постоянного числа оборотов выводного вала.

Механические приводы обеспечивают автоматическое поддержание постоянной скорости на выходе при изменении скорости на входе в диапазоне $1:3,5$, имеют высокий к. п. д. $\eta=0,75-0,85$, но довольно тяжелы в управлении, так как передаточное отношение изменяется на ходу, что требует от сервомеханизма значительных усилий и приводит к увеличению инерционности системы автоматического регулирования. Приводы сложны в изготовлении, относительный вес их — $1,3-1,5\text{ кг/кв.}$

§ 4. ПРОСТОЙ ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ ПРИВОД

В простом гидравлическом приводе, представленном на рис. 2.6, весь поток энергии управляется и передается только в одном направлении — от первичного двигателя (авиадвигателя) к генератору. К. п. д. такого привода около $0,75$, относительный вес $2-2,5\text{ кг/кв.}$

Привод включает гидронасос, преобразующий механическую энергию авиадвигателя в гидравлическую, и гидромотор, преобразующий гидравлическую энергию гидронасоса в механическую, подводимую к валу синхронного генератора. Привод требует абсолютной герметичности и чистоты жидкости, охлаждения жидкости при высоких температурах и имеет тяжелый запуск при низких температурах.

Ротор 1 гидронасоса имеет несколько расположенных по периферии цилиндров 3, камеры которых при вращении ротора поочередно сообщаются с трубопроводами через дугобразные полости неподвижного делительного диска 7 (см. сечение А—А).

При вращении ротора от авиадвигателя поршни 2 вместе с опорной шайбой 6 обкатываются по невращающейся наклонной шайбе 5, совершая возвратно-поступательное движение в цилиндрах 3 и, проходя левую полость делительного диска 7, под действием пружины 4 засасывают масло из линии низкого давления, а проходя правую полость под нажимом наклонной шайбы 5, выталкивают масло через трубопровод высокого давления в объем-

ные камеры ротора гидромотора. Если на выходе из гидронасоса имеется гидравлическое сопротивление, то здесь создается повышенное давление для преодоления этого сопротивления.

Отверстия делительного диска 7 должны быть строго ориентированы относительно оси наклонной шайбы 5. В местах перемычек между полостями диска происходит отсечка масла, т. е. цилиндр

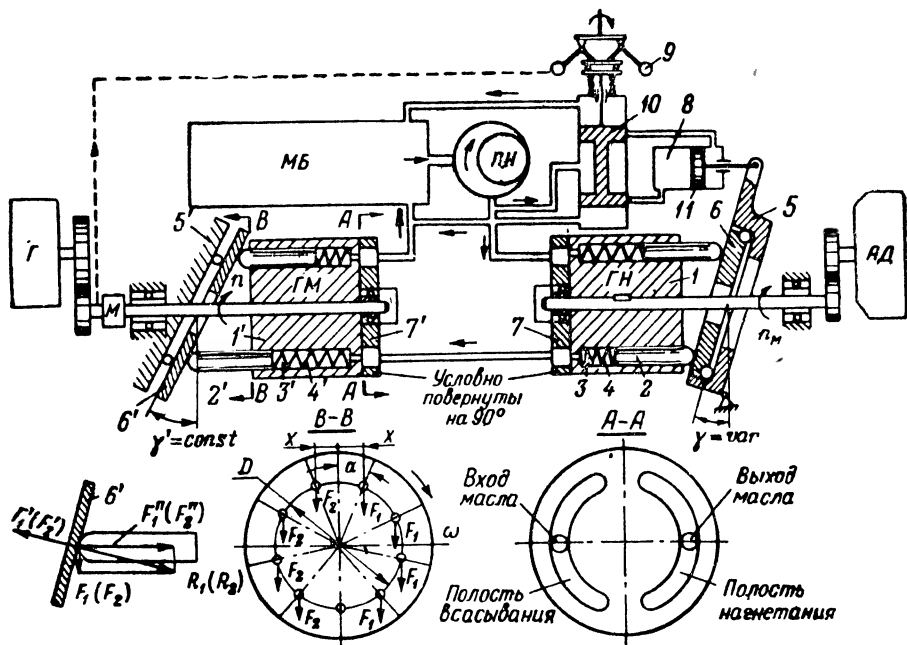


Рис. 2. 6. Принципиальная схема простого гидравлического привода:

АД—авиационный двигатель; ГН—гидронасос; ГМ—гидромотор; М—муфта; Г—генератор; ПН—подкачивающий насос; МБ—маслобак; 1, 1'—роторы; 2, 2'—поршни; 3, 3'—цилиндры; 4, 4'—пружины; 5, 5'—наклонные шайбы; 6, 6'—опорные шайбы; 7, 7'—делительные диски; 8—сервомеханизм; 9—центробежный регулятор; 10—золотник регулятора; 11—поршень

переносит его из всасывающей области в нагнетающую. Перемычки располагаются на участке, где объем масла в цилиндре при прохождении над ними не меняется.

Ход поршней определяется положением наклонной шайбы 5, угол наклона которой устанавливается автоматически сервомеханизмом по команде регулятора скорости.

Производительность гидронасоса, т. е. объем масла Q , подаваемый гидронасосом в минуту, определяется как

$$Q = q m n_m = \frac{\pi d^2}{4} h m n_m = \frac{\pi d^2}{4} D \operatorname{tg} \gamma m n_m = A n_m \operatorname{tg} \gamma \text{ см}^3/\text{мин},$$

где q — рабочий объем одного цилиндра в см^3 ;

m — число поршней;

n_m — скорость приводного вала;

d — диаметр поршня в см;

h — ход поршня в см;

D — диаметр окружности, по которой расположены оси поршней;

γ — угол наклона шайбы 5 гидронасоса;

$$A = \frac{\pi d^2}{4} D m.$$

Производительность насоса можно изменить двумя путями: изменением скорости вращения n_m ротора и изменением величины угла γ наклонной шайбы 5. В первом случае изменяется скорость возвратно-поступательного движения поршней, а во втором — величина хода поршней, т. е. рабочий объем камер. Изменяя угол наклона шайбы одновременно с изменением скорости вращения ротора, можно получить постоянную величину производительности насоса. Этот принцип и положен в основу получения постоянной скорости вращения на выходе гидропривода.

При неизменной скорости вращения производительность насоса плавно регулируется изменением угла наклона шайбы 5. Если шайба занимает перпендикулярное положение к оси насоса, то поршни не могут совершать возвратно-поступательного движения и подача масла отсутствует. Если шайба наклонена в обратную сторону, то направление подачи масла изменяется.

Объемно-роторные гидромашины обладают свойством обратности, т. е. они могут быть как насосами, так и моторами. Вследствие этого конструкция гидромотора принципиально ничем не отличается от конструкции насоса за исключением неподвижной шайбы 5', имеющей постоянный угол наклона γ' к оси мотора. Следовательно, мотор за один оборот потребляет постоянное количество масла, т. с. имеет постоянную производительность.

Объем масла, потребляемого гидромотором в минуту, определяется по формуле, аналогичной производительности насоса:

$$Q_p = A n_p \operatorname{tg} \gamma' \text{ см}^3/\text{мин},$$

где n_p — скорость вращения гидромотора;
 $\gamma' = \text{const}$ — угол наклона шайбы 5' гидромотора.

$$Q_p = Q(1 - S),$$

где S — утечка масла в долях единицы (практически не более 5%).

Подставляя значения Q_p и Q , после преобразований получим

$$n_p = \frac{1 - S}{\operatorname{tg} \gamma'} n_m \operatorname{tg} \gamma = K n_m \operatorname{tg} \gamma.$$

Таким образом, скорость вращения гидромотора пропорциональна тангенсу угла наклона шайбы 5 насоса.

На рис. 2.6 показана схема разложения сил в точках касания поршней гидромотора и наклонной шайбы 5', возникающих вследствие давления жидкости на поршни.

В камеры цилиндров, находящиеся в зоне нагнетания делительного диска 7' (см. сечение $B-B$), подается жидкость под высоким давлением p_1 , а в камеры, расположенные в зоне слива, — под низким давлением p_2 . Под действием этих давлений перпендикулярно их плоскости в точках касания каждого поршня о наклонную шайбу 5' действуют силы: F'_1 — в зоне нагнетания и F'_2 — в зоне слива:

$$F'_1 = \frac{\pi d^2}{4} \frac{p_1}{\cos \gamma'} \quad \text{и} \quad F'_2 = \frac{\pi d^2}{4} \frac{p_2}{\cos \gamma'}.$$

Соответственно в этих точках наклонная шайба воздействует на поршни силами реакции R_1 и R_2 , направленными против сил F'_1 и F'_2 . Силы R_1 и R_2 раскладываются на две составляющие: продольные F''_1 и F''_2 , действующие вдоль осей поршней, и перпендикулярные к ним силы F_1 и F_2 , создающие вращающий момент ротора:

$$F_1 = R_1 \sin \gamma' = \frac{\pi d^2}{4} p_1 \operatorname{tg} \gamma';$$

$$F_2 = R_2 \sin \gamma' = \frac{\pi d^2}{4} p_2 \operatorname{tg} \gamma'.$$

Силы F_1 и F_2 действуют на плечах, длины которых зависят от положения поршней относительно наклонной шайбы 5'. Длины плеч определяются (см. вид $B-B$) как

$$X = \frac{D}{2} \sin \alpha.$$

Если пренебречь величиной p_2 противодействия (которое обычно во много раз меньше, чем давление на входе), то момент относительно оси вращения ротора от одного поршня на стороне высокого давления будет

$$M_1 = p_1 \frac{\pi d^2}{4} \frac{D}{2} \operatorname{tg} \gamma' \sin \alpha.$$

Этот момент меняется по синусоидальному закону в зависимости от угла поворота ротора, т. е. пульсирует от 0 при $\alpha=0$ до $M_{\max}$ при $\alpha = \frac{\pi}{2}$.

Суммарный момент от всех m поршней, находящихся на стороне высокого давления, равен

$$M = \sum M_i = p_1 \frac{\pi d^2}{8} D \operatorname{tg} \gamma' \left[\sin \alpha + \sin \left(\alpha + \frac{2\pi}{m} \right) + \right. \\ \left. + \sin \left(\alpha + \frac{4\pi}{m} \right) \cdot \dots \right].$$

Суммарный момент также непостоянен, а изменяется с периодом колебаний, равным $\frac{2\pi}{m}$. Неравномерность момента уменьшает-

ся при увеличении количества поршней. Причем нечетное их число дает меньшую пульсацию, чем большее четное. Это объясняется тем, что при переходе поршня через линию отсечки при нечетном числе в работе не участвует лишь один поршень.

Регулирование по скорости. При номинальной скорости вращения генератора центробежный регулятор 9 с помощью золотника 10 перекрывает оба канала сервомеханизма 8, фиксируя в определенном положении поршень 11 и наклонную шайбу 5. При увеличении скорости вращения авиадвигателя увеличивается производительность насоса, соответственно возрастают скорости гидромотора и соединенного с ним генератора. Это отклонение скорости генератора от номинальной воспринимается центробежным регулятором 9, который перемещает золотник 10 вверх. Жидкость из напорной линии поступает в правую полость сервомеханизма 8; поршень 11 перемещается влево, уменьшая угол наклона шайбы 5 насоса; производительность насоса при этом уменьшается, возвращаясь к первоначальной, и соответственно скорость вращения гидромотора и генератора снижается до номинального значения. Центробежный регулятор 9 возвращает золотник 10 в первоначальное положение. Золотник перекрывает оба канала сервомеханизма 8, фиксируя новое положение поршня 11 и наклонной шайбы 5, соответствующее новой скорости авиадвигателя. При уменьшении скорости вращения авиадвигателя процесс регулирования гидропривода протекает в той же последовательности, только регулятор 9, золотник 10, поршень 11 и наклонная шайба 5 перемещаются в другую сторону.

Регулирование по мощности. При уменьшении нагрузки в сети генератора момент на валу гидромотора уменьшается. Это вызывает увеличение скорости вращения гидромотора и генератора. Центробежный датчик 9 реагирует на увеличение скорости и регулирует привод как и при увеличении скорости вращения авиадвигателя.

При увеличении нагрузки процесс регулирования происходит аналогично уменьшению скорости вращения авиадвигателя.

§ 5. ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ПРИВОД С ГИДРАВЛИЧЕСКИМ ДИФФЕРЕНЦИАЛОМ (тип 1)

Гидромеханический привод с гидравлическим дифференциалом передает энергию от авиадвигателя к генератору двумя потоками: механическим — неуправляемым и гидравлическим — управляемым.

В механической передаче потока энергии жидкость используется в качестве жесткого звена, обеспечивающего механическую связь вала авиадвигателя с валом генератора.

Гидравлический поток энергии управляется и передается гидравлическим дифференциалом, который при недостатке механической энергии (на малых скоростях вращения) подает дополнитель-

ную энергию к валу генератора гидравлическим путем, а при избытке механической энергии отводит ее гидравлическим путем от вала генератора обратно к валу авиадвигателя рис. 2.7.

Гидромеханический привод в сравнении с простым имеет меньший вес, габариты и повышенный к. п. д. (до 0,85).

Принципиальная схема гидромеханического привода с гидравлическим дифференциалом приведена на рис. 2.8. Привод состоит из: гидронасоса ГН, гидромотора ГМ и системы автоматического регулирования, принцип работы которых аналогичен разобранному в § 2 и 4. Отметим некоторые особенности.

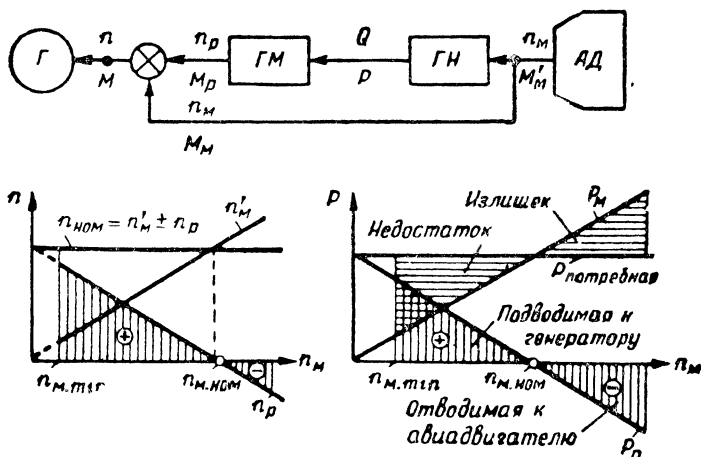


Рис. 2.7. Структурная схема и графики скоростей вращения и мощностей дифференциального гидравлического привода

Роторы 1 насоса и 1' мотора жестко скреплены друг с другом и вращаются как единое целое (барабан) от приводного вала авиадвигателя с переменным числом оборотов n_M . Наклонная шайба 5 насоса связана с сервомеханизмом 8 системы регулирования и может менять свое положение на угол γ в обе стороны от нуля. Наконечник шайбы 5' гидромотора имеет неизменный угол наклона γ' и вращается с постоянной скоростью.

Делительный диск 7' жестко связан с шайбой 5' и вращается синхронно с ней, а его дуговые полости строго ориентированы относительно плоскости этой шайбы.

При расчетном режиме шайба 5 насоса устанавливается на нулевой угол ($\gamma=0$), точнее, на угол, обеспечивающий компенсацию утечек в насосе, гидромоторе и поддержание необходимого давления в гидросистеме. В этом случае поршни 2 не имеют осевых перемещений. Жидкость не циркулирует между поршнями 2 и 2', а образует гидравлический замок. Поршни 2' оказываются жестко связанными с шайбой 5' и не имеют возможности повернуться от-

носителю ее. Вследствие жесткой связи, вызванной гидравлическим замком, вся мощность от авиадвигателя к генератору передается только механически, а скорость его вращения определяется скоростью вращения авиадвигателя, т. е. без учета механического редуктора гидропривода $n = n_m$. Некоторое проскальзывание ($n < n_m$) возможно лишь за счет утечек.

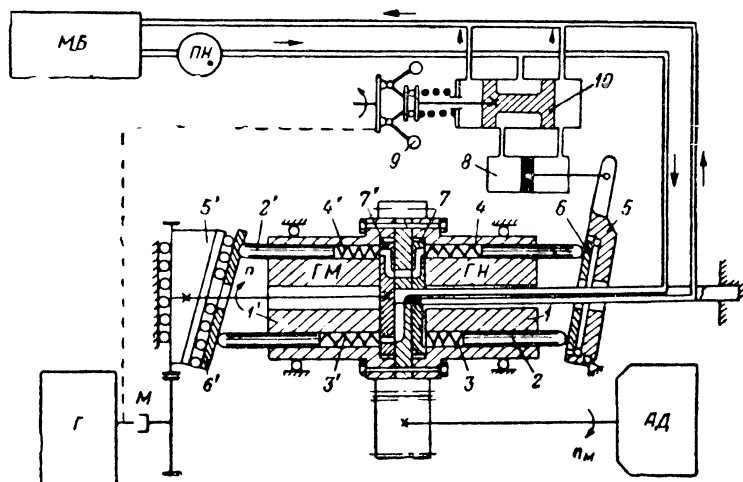


Рис. 2. 8. Принципиальная схема гидромеханического привода с гидравлическим дифференциалом:

АД—авиационный двигатель; ГН—гидронасос; ГМ—гидромотор; М—муфта; Г—генератор; ПН—подкачивающий насос; МБ—маслобак; 1, 1'—поршни; 2, 2'—поршни; 3, 3'—цилиндры; 4, 4'—пружины; 5, 5'—наклонные шайбы; 6, 6'—опорные шайбы; 7, 7'—делительные диски; 8—серво-механизм; 9—центробежный регулятор; 10—золотник регулятора

Если скорость авиадвигателя по отношению к скорости выходного вала снизились ($n_m < n$), то шайба 5 системой автоматики отклонится в положительную сторону. При вращении барабана поршни 2 вместе с опорным подшипником 6 обкатываются по наклонной шайбе 5, совершая возвратно-поступательное движение и нагнетают жидкость в цилиндры гидромотора. Гидромотор, вращаясь в общем барабане, преобразует возвратно-поступательное движение поршней во вращательное движение наклонной шайбы 5'. Скорость вращения этой шайбы без учета утечек определяется так:

$$n_p = n_m \frac{\operatorname{tg} \gamma}{\operatorname{tg} \gamma'}.$$

Таким образом, скорость вращения шайбы 5', получаемая гидравлическим путем, прямо пропорциональна скорости насоса и отношению тангенса угла наклона шайбы 5 насоса к тангенсу угла наклона шайбы 5' гидромотора.

Так как корпус насоса и гидромотора представляют собой одно целое, то скорость вращения выходного вала привода (наклонной шайбы 5') определяется суммой двух скоростей — скорости вращения корпуса насоса и скорости проскальзывания шайбы 5' относительно шайбы 6' вследствие возвратно-поступательного движения поршней:

$$n = n_m + n_m \frac{\operatorname{tg} \gamma}{\operatorname{tg} \gamma'} = n_m \left(1 + \frac{\operatorname{tg} \gamma}{\operatorname{tg} \gamma'} \right) = \text{const.}$$

Если скорость авиадвигателя возросла по отношению к скорости выходного вала ($n_m > n$), то шайба 5 системой автоматики отклонится в отрицательную сторону. Насос и гидромотор меняются местами. Благодаря этому шайба 5' начинает тормозиться, а ее суммарная скорость вращения сохраняет постоянное значение

$$n = n_m - n_m \frac{\operatorname{tg} \gamma}{\operatorname{tg} \gamma'} = n_m \left(1 - \frac{\operatorname{tg} \gamma}{\operatorname{tg} \gamma'} \right) = \text{const.}$$

При этом на роторе 1—1' получается избыток мощности, которая посредством поршней 2' отводится в жидкость, а от жидкости через поршни 2 возвращается на вал авиадвигателя.

В этом приводе мощность от авиадвигателя передается к генератору двумя путями: механическим — непосредственно через ротор и цилиндры гидромотора на шайбу 5' и гидравлическим — через насос в жидкость, а затем от жидкости через поршни гидромотора к той же шайбе 5' на ведомый вал

$$P = \frac{1}{\eta_g} P_g = P_m + P_p,$$

где P_g — электромагнитная мощность генератора;

P_m — механическая составляющая мощности;

P_p — гидравлическая составляющая мощности.

Механическая мощность не меняет свое направление, а величина ее зависит лишь от величины нагрузки (давления p) и величины скорости вращения авиадвигателя и передается через корпус и поршни гидромотора ГМ на шайбу 5'

$$P_m = \eta_m C_n p n_m [\text{квт}],$$

где η_m — механический к. п. д. гидропривода;

C_n — коэффициент пропорциональности.

Гидравлическая мощность может менять свой знак в зависимости от величины механической мощности, поступающей от авиадвигателя, и определяется

$$P_p = \frac{\eta_m}{612} Q p [\text{квт}].$$

Рассмотрим в качестве примера гидромеханический привод фирмы Сандстренд, конструкция и схема управления которого показаны на рис. 2.9 и 2.10.

Насос и мотор аксиального многоплунжерного типа расположены в одном корпусе, жестко связаны между собой и приводятся во вращение от вала авиадвигателя. Их роторы имеют несколько цилиндров, расположенных по периферии.

Плунжеры насоса перемещаются в цилиндрах вследствие давления на них регулируемой наклонной шайбы 4. Рабочий ход плун-

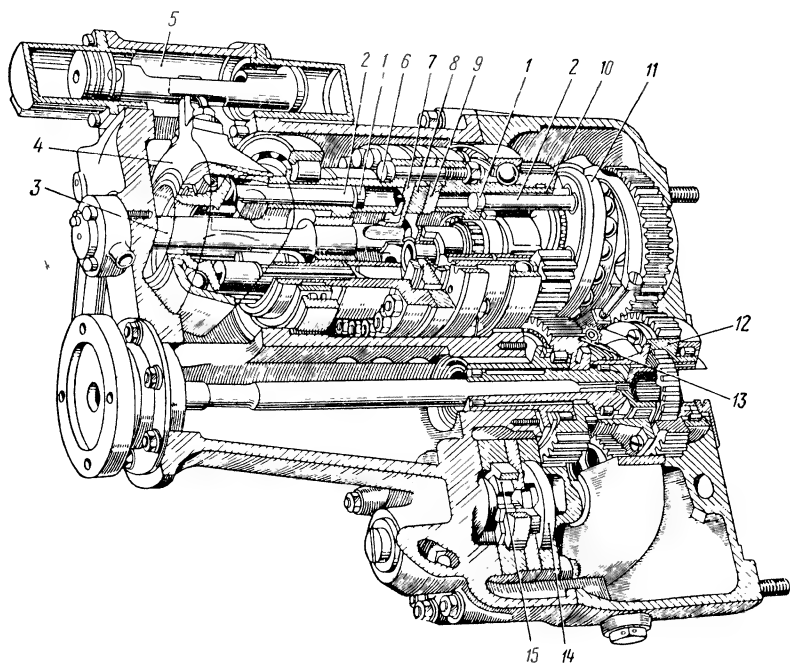


Рис. 2. 9. Конструкция гидромеханического привода с гидравлическим дифференциалом фирмы Санстренд:

1, 2—плунжеры регулируемого и нерегулируемого роторов; 3—вал регулируемого ротора; 4—регулируемая наклонная шайба; 5—сервопоршень; 6—регулируемый ротор; 7—неподвижный распределительный диск; 8—питающая шайба; 9—вращающийся делительный диск; 10—нерегулируемый ротор; 11—нерегулируемая наклонная шайба; 12, 13—выходная и входная шестерни; 14—подкачивающий насос; 15—огкачивающий насос

жеров меняется между двумя максимумами (проходя через нуль) в зависимости от угла установки этой шайбы.

Наклонная шайба 11 гидромотора имеет постоянный угол наклона и жестко связана с валом генератора.

Между двумя наборами плунжеров расположены два распределительных диска 7 и 9, которые распределяют масло между насосом и мотором. Диск 7 смонтирован на неподвижной оси, а диск 9 установлен на эксцентричной цапфе выходного вала. Между распределительными дисками 7 и 9 установлена питающая шайба 8 с перепускными окнами, которая жестко связана с ротором.

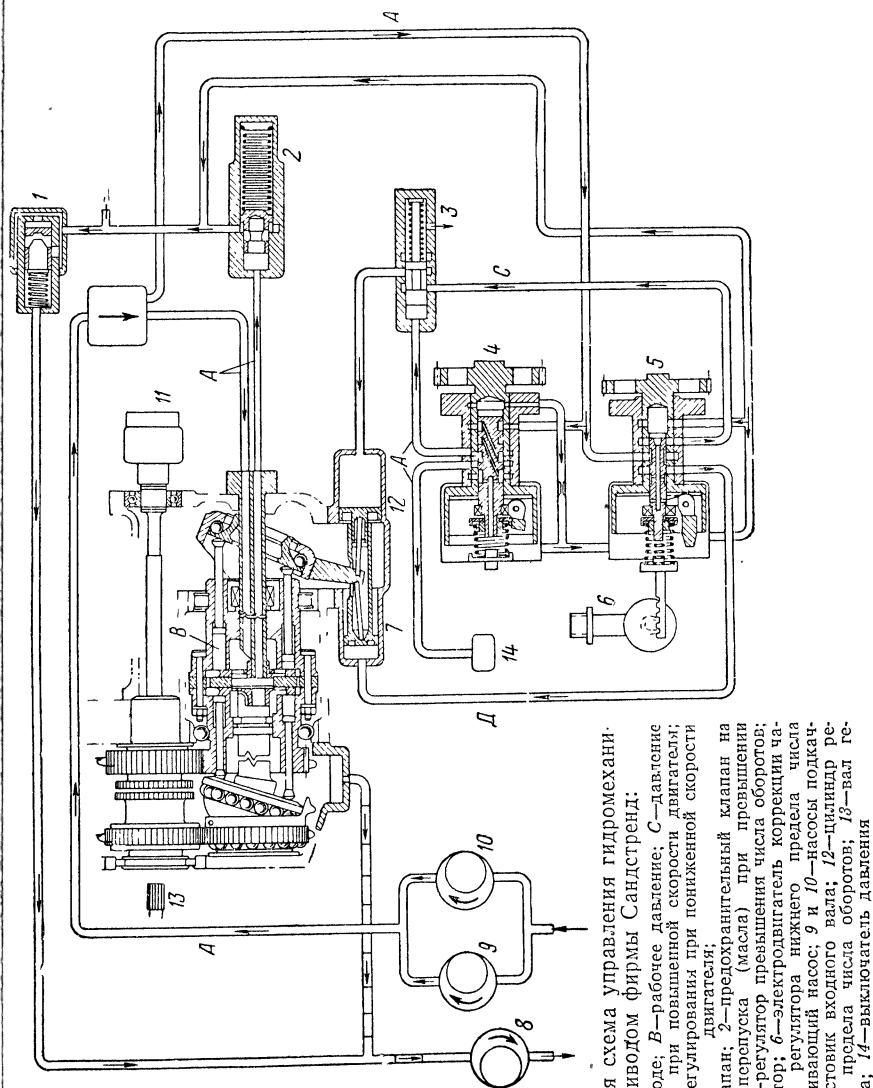


Рис. 2. 10. Общая схема управления гидромеханическим приводом фирмы Сандстрем.

A—давление на входе; *B*—рабочее давление; *C*—давление для регулирования при повышенной скорости двигателя; *D*—давление для регулирования при пониженной скорости двигателя;

1—перепускной клапан; 2—предохранительный клапан на входе; 3—клапан перепуска (масла) при превышении числа оборотов; 4—регулятор превышения числа оборотов; 5—главный регулятор; 6—электродвигатель коррекции частоты; 7—цилиндр регулятора нижнего предела числа оборотов; 8—откачивающий насос; 9 и 10—насосы подкачки масла; 11—хвостик входного вала; 12—цилиндр регулятора верхнего предела числа оборотов; 13—вентиль регулятора; 14—выключатель давления

При вращении узла роторов положение наклонной шайбы 4 гидронасоса устанавливает регулятор в зависимости от режима его настройки. В соответствии с разностью скоростей между входным и выходным валом к плунжерам гидромотора под высоким давлением поступает необходимое количество масла. Вследствие этого плунжеры за счет осевой составляющей силы давления передают полную скорость вращения гидромотора шайбе 11, а за счет составляющей силы давления, перпендикулярной к оси ротора, создают на шайбе 11 вращающий момент, увеличивающий скорость вращения выходного вала.

Система регулирования выполнена таким образом, что пока число оборотов на выходе не достигнет 6000 *об/мин*, шайба 4 гидронасоса остается в положении полного хода плунжеров, при котором усиленный подвод масла обеспечивает увеличение числа оборотов на выходе по сравнению с числом оборотов на входе.

Когда заданное число оборотов на выходе достигнуто, система находится в равновесии до тех пор, пока число оборотов на входе не возрастет. В этом случае регулятор скорости уменьшит угол наклонной шайбы 4 гидронасоса и таким образом снизит его производительность. Это приведет к установлению заданной скорости вращения на выходе.

Когда число оборотов на входе равно требуемому числу оборотов на выходе, наклонная шайба 4 гидронасоса займет нейтральное положение (если не учитывать утечек масла), плунжеры не могут совершать поступательного движения, образуется гидравлический замок и система работает как жесткий привод. В этом случае мощность от авиадвигателя передается к генератору только механическим путем с высоким к. п. д. Расчетный режим выбирается из условия максимальной его продолжительности в течение полета.

Дальнейшее увеличение скорости вращения на выходе вызывает обратный поворот наклонной шайбы 4 гидронасоса, так что гидромотор начинает работать в режиме гидронасоса, а гидронасос забирает это избыточное масло и подает в обратном направлении, т. е. в полость подпитки. Вследствие этого шайба 11 проскальзывает в противоположном направлении и скорость генератора восстанавливается до номинальной.

Система регулирования поддерживает заданную скорость вращения генератора и равномерное распределение загрузки между параллельно включенными генераторами и состоит из главного регулятора, электродвигателя точной регулировки частоты, регулятора частоты и уравнивателя загрузки генераторов.

Действие этой системы обеспечивает точную установку наклонной шайбы 4 гидронасоса посредством сервомеханизма и соответственно заданную скорость вращения генератора.

Главный регулятор представляет собой гидравлический золотник, управляемый центробежным датчиком и электродвигателем-корректором. Золотник регулирует подачу масла в сервомеханизм.

Втулка регулятора связана с валом привода генератора. На втулке установлены грузики, рычаги которых воздействуют на двухпосадочный золотник, поджатый двумя пружинами. Главная пружина обеспечивает предварительную затяжку, а затяжка меньшей пружины регулируется электродвигателем регулятора частоты.

При изменении скорости вращения авиадвигателя или нагрузки генератора золотник регулятора переместится в ту или другую сторону и сообщит полость масла повышенного давления с соответствующей полостью сервомеханизма.

При установившейся заданной скорости вращения золотник занимает нейтральное положение и перекрывает магистрали, ведущие к сервомеханизму установки шайбы 4, что запирает наклонную шайбу 4 в определенном положении.

Нагрузка распределяется между параллельно включенными генераторами и приводами автоматически посредством затяжки меньшей пружины главного регулятора, связанного с каждым приводом. Затягивается пружина шестерней электродвигателя, получающего сигналы через магнитный усилитель от трансформаторов тока, имеющихся в цепях генераторов.

Второй центробежный регулятор, связанный с выходным валом, реагируя на повышение или понижение скорости вращения свыше допустимых пределов, выдает гидравлический сигнал к выключателю давления и в распределительный клапан, стравливающий давление масла, идущего от главного регулятора к сервомеханизму.

Электрические контакты выключателя давления предназначены для соединения с соответствующими реле в бортовой системе, с тем чтобы генератор переменного тока не мог оставаться нагруженным, когда привод постоянной скорости имеет повышенную или пониженную выходную скорость.

Запас масла для блока цилиндров и регулировочных операций обеспечивают два встроенных насоса, один из которых приводится во вращение от входного вала, а другой — от выходного. Этим обеспечивается надежный контакт плунжеров с наклонными шайбами. Предусмотрен и маслоотсасывающий насос, приводимый во вращение от выходного вала.

Гидропривод связан с генератором обгонной муфтой пружинного типа, которая передает вращающий момент только в направлении от авиадвигателя к генератору и исключает таким образом работу последнего в режиме двигателя.

Смазка гидропривода обеспечивается отбором масла от подающей системы. В системе предусмотрен маслобак, теплообменник и металлический 33-микронный фильтр.

§ 6. ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ПРИВОД С ГИДРАВЛИЧЕСКИМ ДИФФЕРЕНЦИАЛОМ (тип 2)

В гидравлическом приводе с гидравлическим дифференциалом типа 2 ротор, сочлененный с валом авиадвигателя, имеет неизменный рабочий объем, а скорость вращения генератора регулируется

за счет регулируемого объема камер второго ротора. Конструктивная схема такого привода приведена на рис. 2. 11.

Ротор 2, соединенный с валом 1 авиадвигателя, имеет радиальные камеры, в которых могут перемещаться шариковые плунжеры 3. Ротор с шариками охватывает кольцевая обойма 4, имеющая эксцентриситет по отношению к оси ротора 2. Обойма 4 выполнена заодно с выходным валом 6 и вторым ротором 7, имеющим радиальные камеры с шариковыми плунжерами 8.

При вращении ротора 2 относительно обоймы 4 шарики 3 совершают возвратно-поступательные движения, вследствие чего жидкость из полости низкого давления перекачивается в полость высокого давления и по делительным каналам вала 6 и неподвижной делительной втулке 5 поступает в камеры ротора 7.

Регулируемая обойма 9 с помощью сервопоршня 10 устанавливается с эксцентриситетом относительно вала 6. При увеличении скорости вращения авиадвигателя обойма 9 устанавливается на меньший эксцентриситет, вследствие чего плунжеры 8 обеспечивают меньший рабочий объем камер ротора. Скорость вращения ротора 7 и вместе с ним обоймы 4 относительно вала 1 и ротора 2 уменьшается при сохранении постоянной абсолютной скорости вращения генератора.

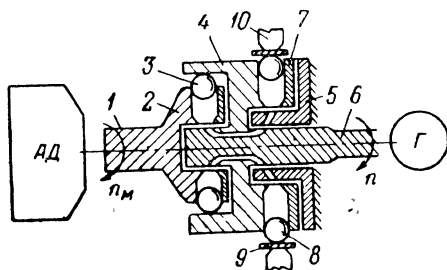


Рис. 2. 11. Конструктивная схема гидромеханического привода с гидравлическим дифференциалом:

АД—авиационный двигатель; Г—генератор; 1—приводной вал; 2—«нерегулируемый» ротор; 3—шариковые плунжеры; 4—кольцевая обойма; 5—делительная втулка; 6—выходной вал; 7—регулируемый ротор; 8—шариковые плунжеры; 9—регулируемая кольцевая обойма; 10—управляющий сервопоршень

При скорости вращения ротора 2, равной номинальной скорости вращения генератора, регулятор устраняет эксцентриситет обоймы 9, вследствие чего плунжеры 8 уже не могут совершать поступательные движения. Между плунжерами 3 и 8 образуется гидравлический замок; вал 6 через обойму 4, плунжеры 3 и ротор 2 жестко сцепляется с валом 1 авиадвигателя.

При дальнейшем увеличении скорости вращения авиадвигателя эксцентриситет обоймы 9 становится отрицательным, что превращает ротор 7 в насос, а ротор 2 — в гидромотор. Гидравлический замок снимается и жидкость перекачивается в обратном направлении, ротор 2 обгоняет обойму 4.

Рассмотрим в качестве примера гидромеханический привод фирмы Дженерал Электрик.

Привод состоит из гидронасоса переменной производительности, связанного с валом авиадвигателя, и гидромотора, сцепленного с помощью сферических поршней с валом синхронного генера-

тора. Гидронасос и гидромотор расположены в одном корпусе, как показано на рис. 2. 12.

Гидронасос состоит из неподвижного наружного корпуса и вращающегося в нем ротора 1 с семью радиально расположенными цилиндрическими каналами, в каждом из которых имеется сферический плунжер 2. Между неподвижным корпусом и ротором на-

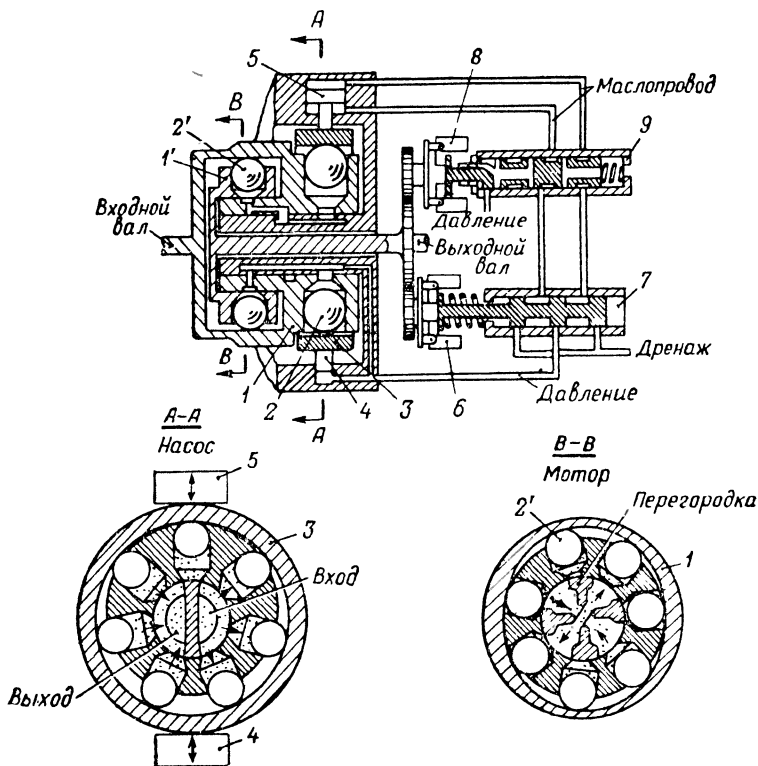


Рис. 2. 12. Гидромеханический привод фирмы Джeneral Электрик:

1, 1'—роторы; 2, 2'—плунжеры; 3—кольцо; 4—поршень обратного хода; 5—поршень прямого хода; 6—центробежный регулятор; 7—золотник; 8—регулятор превышения скорости; 9—золотник

ходится кольцо 3, опирающееся своей внешней поверхностью на поршни 4 и 5, которые могут перемещаться в цилиндрах корпуса в радиальном направлении под воздействием системы регулирования. Перемещение этих поршней вызывает смещение кольца и изменение его эксцентриситета относительно оси вращения ротора. Сферические плунжеры ротора, опираясь на внутреннюю поверхность кольца, за счет его эксцентриситета перемещаются в радиальном направлении пропорционально величине эксцентриситета. Сферические плунжеры при перемещении выжимают масло в ка-

нал полого вала, откуда оно поступает в семь радиально расположенных цилиндрических каналов гидромотора со сферическими плунжерами 2'. При эксцентриситете, равном нулю, сферические плунжеры находятся в покое и масло не накачивается.

Ротор гидромотора 1' находится внутри ротора гидронасоса. Сферические плунжеры 2' ротора гидромотора опираются на внутреннюю эллиптическую поверхность ротора гидронасоса. Под воздействием давления масла, поступающего из канала полого вала, плунжеры гидромотора перемещаются в радиальном направлении, опираясь на вращающуюся эллиптическую поверхность ротора гидронасоса, приводят во вращательное движение ротор гидромотора.

Схема соединения маслопроводящих каналов выполнена так, что система регулирования, меняя величину и направление давления масла, обеспечивает проскальзывание или докрутку ротора гидромотора относительно ротора гидронасоса и поддерживает постоянство скорости вращения выходного вала.

При вращении узла цилиндров насоса со скоростью авиадвигателя узел цилиндров гидромотора будет иметь скорость (большую или меньшую) в зависимости от положения поршней, регулирующих степень эксцентricитeтнoсти насосного узла в корпусе.

Привод выполнен в двух вариантах: первый на 20 ква (30 л. с. весом 15,8 кг) обеспечивает постоянную скорость выходного вала 8000 об/мин при изменении скорости авиадвигателя от 4000 до 8300 об/мин и второй на 40 ква (60 л. с. весом 22,7 кг) обеспечивает постоянную скорость выходного вала 6000 об/мин при изменении скорости авиадвигателя от 4000 до 8300 об/мин.

Точность регулирования частоты переменного тока составляет $\pm 1\%$ и может быть доведена при помощи электрического корректора до $\pm 0,25\%$.

§ 7. ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ПРИВОД С ПЛАНЕТАРНЫМ ДИФФЕРЕНЦИАЛОМ

Большая часть мощности в таком приводе передается от авиадвигателя к генератору механической планетарной передачи с высоким к. п. д., а через гидравлическую передачу в том или ином направлении передается лишь некоторая часть полной мощности.

В расчетном режиме работы привода при скорости авиадвигателя $n_{расч} = n_{м.ср} = \frac{n_{м\ max} + n_{м\ min}}{2}$, соответствующей крейсерскому режиму полета, вся мощность передается чисто механическим путем через планетарную передачу, гидropередача при этом практически не работает.

Возможен целый ряд различных комбинаций дифференциального механизма с гидropередачей, однако их можно свести к двум основным схемам компоновки:

— включение гидropередачи между ведущим и вспомогательным валами, т. е. разветвление мощности на ведущем валу

— включение гидropередачи между вспомогательным и ведомым валами, т. е. разветвление мощности на ведомом валу.

Гидромашина, соединенная с ведущим или ведомым валом, является неререверсивной, но должна быть регулируемой. Гидромашина, присоединенная к дифференциальному механизму ДМ, в общем случае является реверсивной и может быть нерегулируемой.

Каждая из этих гидромашин в зависимости от скорости вращения авиадвигателя может попеременно работать как в режиме насоса, так и в режиме гидромотора.

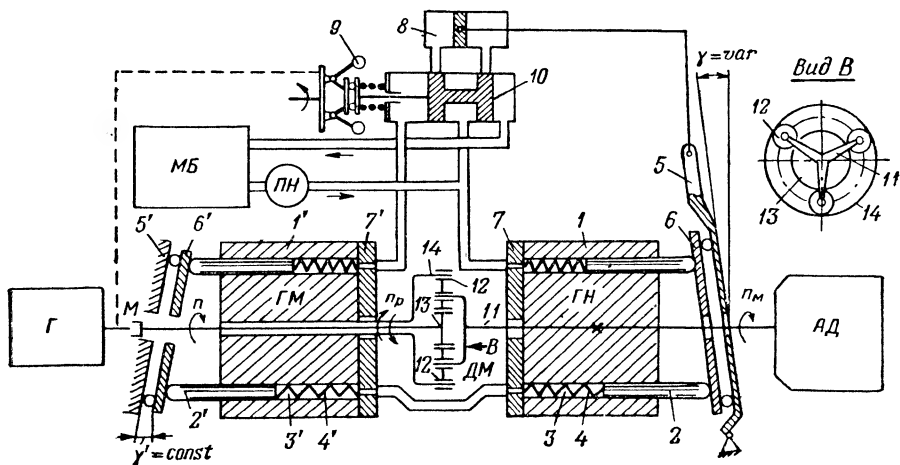


Рис. 2.13. Принципиальная схема гидромеханического привода с планетарным дифференциалом:

АД—авиационный двигатель; ГН—гидронасос; ГМ—гидромотор; М—муфта; Г—генератор; ПН—подкачивающий насос; МБ—маслобак; ДМ—дифференциальный механизм; 1, 1'—ротор 2, 2'—поршень; 3, 3'—цилиндр; 4, 4'—пружина; 5, 5'—наклонная шайба; 6, 6'—опорные подшипники; 7, 7'—делительный диск; 8—сервомеханизм; 9—центробежный регулятор; 10—золотник регулятора; 11—водило сателлитов; 12—сателлиты; 13—солнечная шестерня; 14—коронная шестерня

Возможен целый ряд различных комбинаций планетарного редуктора в гидроприводе. Однако принцип работы гидромеханического привода остается тот же, что и в рассмотренном случае гидромеханического привода с гидравлическим дифференциалом.

Одна из конструктивных схем гидромеханического привода с планетарным дифференциалом приведена на рис. 2.13.

Привод состоит из: гидронасоса ГН, гидромотора ГМ, дифференциального механизма ДМ и системы автоматического регулирования, принцип работы которых аналогичен рассмотренным выше. Отметим некоторые особенности.

Ротор 1 насоса и водило 11 сателлитов вращаются от приводного вала авиадвигателя с переменной скоростью n_m . Регулируемая шайба 5 насоса связана с сервомеханизмом 8 системы регулирования и может менять свое положение на угол γ в обе стороны от

нуля. Нерегулируемая шайба 5' гидромотора имеет неизменный угол наклона γ' . Коронная шестерня 14 жестко связана с ротором 1' гидромотора. Солнечная шестерня 13 жестко связана с валом генератора. Делительные диски 7 и 7' неподвижны и их дуговые полости строго ориентированы относительно плоскостей соответствующих шайб 5 и 5'.

При расчетном режиме шайба 5 насоса устанавливается на нулевой угол ($\gamma=0$), точнее на угол, обеспечивающий компенсацию утечек в насосе, гидромоторе и поддержание потребного давления в гидросистеме. В этом случае поршни 2 не имеют осевых перемещений. Жидкость не циркулирует между поршнями 2 и 2', а образует гидравлический замок. Поршни 2' оказываются жестко связанными с шайбой 5' и не могут повернуться относительно ее. Следовательно, ротор 1' гидромотора вместе с коронной шестерней 14 оказываются неподвижными. Вследствие этого вся мощность от авиадвигателя к генератору передается только механическим путем, а его скорость вращения определяется скоростью вращения авиадвигателя и механическим редуктором гидропривода, т. е. $n=n'_m$,

где n — скорость вращения выходного вала привода;
 n'_m — скорость вращения авиадвигателя с учетом передаточного отношения редуктора.

Если скорость авиадвигателя снижается ($n'_m < n$), то шайба 5 автоматически отклоняется в сторону насосного режима ГН. Поршни 2 на опорном подшипнике 6 обкатываются по наклонной шайбе 5, совершая возвратно-поступательное движение, и нагнетают жидкость в цилиндры гидромотора ГМ. Поршни 2' передают давление на неподвижную наклонную шайбу 5', реакции которой воздействуют на весь корпус гидромотора, образуя две составляющие силы (см. § 4), одна из которых создает вращающий момент, который через коронную шестерню 14 вызывает дополнительную скорость вращения сателлитов 12. Дополнительная скорость вращения выходного вала без учета утечек определяется формулой

$$n_p = n''_m \frac{\operatorname{tg} \gamma}{\operatorname{tg} \gamma'},$$

где n''_m — скорость вращения авиадвигателя с учетом передаточного отношения редуктора 14-12-13.

Таким образом, сателлиты, получая вращение по двум каналам: от водила, пропорционально скорости авиадвигателя, и от коронной шестерни, пропорционально скорости гидромотора, увеличивают скорость вращения солнечной шестерни и соответственно выходного вала до $n = \text{const}$:

$$n = n'_m + n_p = n'_m + n''_m \frac{\operatorname{tg} \gamma}{\operatorname{tg} \gamma'} = \text{const}.$$

При этом поток мощности от авиадвигателя к генератору идет двумя путями: непосредственно через механическую передачу АД-11-12-13-Г и через регулируемую гидравлическую передачу АД-ГН-ГМ-14-12-13-Г.

Если скорость вращения авиадвигателя повысилась ($n'_m > n$), то шайба 5 автоматически отклоняется в сторону моторного режима ГН. Гидронасос ГН становится мотором, а ГМ — насосом. Благодаря этому ГН вместе с коронной шестерней 14 начинает вращаться в обратную сторону, замедляя вращение сателлитов 12; соответственно уменьшается скорость вращения выходного вала до $n = \text{const}$.

К. П. Д. и вес гидромеханических приводов. Потери мощности в гидроприводе влекут за собой нагрев рабочей жидкости. Во избежание перегрева необходим достаточно большой ее объем и охлаждающие устройства, что увеличивает вес.

К. п. д. гидромеханического привода имеет наибольшее значение η_{max} на расчетном режиме, когда мощность передается механическим путем. При этом одна из гидромашин вращается вхолостую (точнее — обеспечивает компенсацию утечек для поддержания давления в системе), а другая в это время неподвижна и удерживает вспомогательное звено дифференциального механизма. Поэтому потери мощности в гидравлической части привода на расчетном режиме ничтожно малы.

На режимах, отличных от расчетного, механическая мощность передается с к. п. д. η_{max} , а гидравлическая — с к. п. д. простого гидропривода. При отклонении от расчетного режима в обе стороны общий к. п. д. привода падает по гиперболическим кривым от значения η_{max} до минимальных значений.

Большую часть времени гидромеханический привод работает на режимах, близких к расчетному, и, следовательно, его к. п. д. при этом близок к максимальному (0,85—0,95).

Удельный вес гидропривода приблизительно равен 0,6—1 кг/квт для диапазона регулирования по скорости 1:3 с расчетным режимом, расположенным в середине диапазона.

Для турбинного двигателя с диапазоном скоростей примерно 1:1,3 гидропривод будет иметь меньший вес. Редуктор при этом должен быть рассчитан на мощность, превышающую номинальную лишь на 13%, а гидромашинка должна обладать мощностью, равной 13% от номинальной. Удельный вес гидромеханического привода в этом случае будет примерно 0,5 кг/квт.

§ 8. ПРОСТОЙ ПНЕВМАТИЧЕСКИЙ ПРИВОД

В простом пневматическом приводе с турбиной весь поток энергии управляется и передается только в одном направлении от авиадвигателя к генератору.

Турбина привода питается сжатым воздухом от компрессора авиадвигателя. Энергия для вращения получается за счет расширения воздуха в сопловом аппарате турбины.

Мощность, развиваемая турбиной, зависит от весового расхода воздуха и перепада температур в ней. Весовой расход воздуха определяется давлением и температурой питающего воздуха, к. п. д. турбины и сечением сопла.

С увеличением высоты полета весовой расход воздуха падает, а перепад температуры в турбине растет. Следовательно, мощность, развиваемая турбиной, почти не зависит от высоты полета.

С увеличением скорости полета мощность, развиваемая турбиной, возрастает, поэтому турбину проектируют на режим малого газа. На крейсерской скорости мощность, отдаваемую турбиной, искусственно снижают дросселированием воздуха на входе турбины или изменением проходного сечения сопла. Последнее дает наибольший эффект, но усложняет конструкцию и увеличивает вес турбины.

Недостатки. 1. Низкий к. п. д. воздушной турбины, зависящий от степени адиабатического расширения (отношения давлений на входе и выходе). Максимальная величина его не превышает 0,6.

2. Отбор воздуха от компрессора авиадвигателя на больших высотах вызывает значительное снижение тяги или мощности реактивного двигателя, хотя эта доля от общей массы воздуха компрессора и невелика.

3. Привод малозаконоумен, так как весь поток сжатого воздуха, отбираемый от авиадвигателя, приводит к дополнительному расходу горючего и соответствующему увеличению полетного веса летательного аппарата.

Приводы с газовой турбиной являются приводами прямого потока энергии и могут работать на выхлопных газах от основных авиадвигателей или на топливно-воздушных смесях.

Турбины, работающие на выхлопных газах, не имеют собственных камер сгорания, просты по устройству и обладают малым весом и габаритами.

Турбины, работающие на топливно-воздушных смесях, имеют более сложное устройство вследствие установки перед сопловым аппаратом камер сгорания, в которых сжигается дополнительно подводимое топливо. Это уменьшает расход воздуха, отбираемого от компрессора авиадвигателя, по сравнению с воздушной турбиной той же мощности.

§ 9. ПНЕВМОМЕХАНИЧЕСКИЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ ПРИВОД ПОСТОЯННОЙ СКОРОСТИ С ПНЕВМОТУРБИНОЙ

На рис. 2. 14 показаны блок-схема и характеристики пневмомеханического дифференциального привода постоянной скорости с пневмотурбиной.

Привод имеет следующие основные элементы:

1. Дифференциальный редуктор, суммирующий два потока

энергии: нерегулируемый — поступающий с вала авиадвигателя и регулируемый — снимаемый с пневмоторбины.

2. Пневмоторбину, которая по команде системы регулирования, управляет частью потока энергии, обеспечивая тем самым постоянную скорость вращения генератора.

В пневмоторбине используется кинетическая энергия потока сжатого воздуха, отбираемого от компрессора авиадвигателя или другого источника воздушной энергии. В качестве рабочего органа

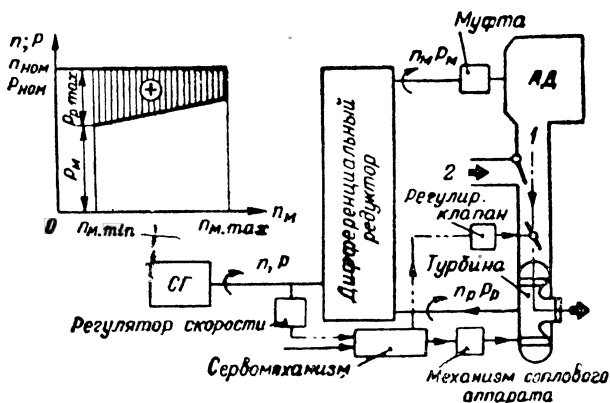


Рис. 2.14. Блок-схема и характеристики пневмомеханического дифференциального привода с пневмоторбиной:

1—воздух, отбираемый от компрессора; 2—вход воздуха при запуске, работе на земле и при питании от другого двигателя

рекомендуется применять радиальную турбину, обладающую существенными преимуществами по сравнению с аксиальной.

3. Систему регулирования, создающую необходимый режим работы турбины. В этой системе регулятор скорости реагирует на отклонение скорости вращения генератора от номинальной и выдает соответствующий сигнал в сервомеханизм, который передает команды исполнительному механизму соплового аппарата и регулирующему клапану входящего воздуха; последние соответственно корректируют режим работы турбины. В системе предусматривается специальный корректор, реагирующий на отклонение частоты и неравномерность загрузки генераторов при параллельной работе и выдающий соответствующий сигнал в сервомеханизм.

4. Систему предохранительных устройств, автоматически вступающую в действие при отказе отдельных элементов системы регулирования. Если скорость привода превышает максимально допустимую скорость генератора или турбины, или минимальную скорость генератора, то привод автоматически отключается от энергосистемы.

В конструктивном оформлении привод целесообразно выполнять в многоцелевом назначении, что снижает вес и габариты всего комплекса оборудования.

Привод решает следующие задачи:

1. Обеспечивает запуск основного авиадвигателя с помощью турбины при подаче сжатого воздуха от бортового или наземного турбоагрегата, а также от работающего авиадвигателя многомоторного самолета.

2. При остановке авиадвигателя в полете турбина, получая сжатый воздух от работающего авиадвигателя или вспомогательного источника воздушной энергии, обеспечивает постоянную скорость вращения генератора.

3. Обеспечивает наземную проверку электрической системы, включая генератор, при неработающем авиадвигателе. В этом случае для вращения турбины используется сжатый воздух от бортового или наземного турбоагрегата.

4. Обеспечивает постоянную скорость генератора при всех условиях полета и режимах работы авиадвигателя, включая режим малого газа. При этом основная мощность от авиадвигателя передается механическим путем, а регулируемая — с помощью турбины.

Преимущества. 1. Относительная простота конструкции.

2. Уменьшение количества трущихся кинематических пар, что повышает надежность.

3. Отсутствие необходимости в охлаждающей системе.

4. Возможность совмещения ряда функций: привода, стартера для запуска авиадвигателя, охладителя и др.

5. Малый вес конструкции.

Недостатки. 1. Сложность реверсирования турбины; необратимость турбины ведет к завышению мощности и снижению ее к. п. д.

2. Наличие «мягких» регулировочных характеристик, нежелательных при параллельной работе генераторов.

3. Низкий к. п. д., особенно при широком диапазоне изменения параметров воздуха.

На рис. 2.15 представлена принципиальная схема пневмомеханического дифференциального привода постоянной скорости с пневмотурбиной фирмы Эрисерч.

Передачный механизм привода состоит из двух составных планетарных шестеренчатых передач, связанных между собой общей кольцевой шестерней с внутренним зацеплением. Входной вал, проходящий через пустотелый ротор генератора, связан с поводком планетарной передачи. Солнечная шестерня генератора связана с одной парой, а солнечная шестерня турбины — с другой парой планетарной передачи.

Привод обеспечивает три различных режима работы:

1. Запуск авиадвигателя от турбины. При запуске кольцевая шестерня 9 стопорится пусковой муфтой сцепления 11. Мощность

от турбины передается к авиадвигателю шестеренчатой передачей Т-2-4-6-8-10-1-АД, обеспечивающей необходимое для запуска передаточное отношение.

2. Получение постоянной скорости генератора только от турбины. Это соответствует режиму неработающего авиадвигателя, когда поводок планетарной передачи неподвижен. Мощность от тур-

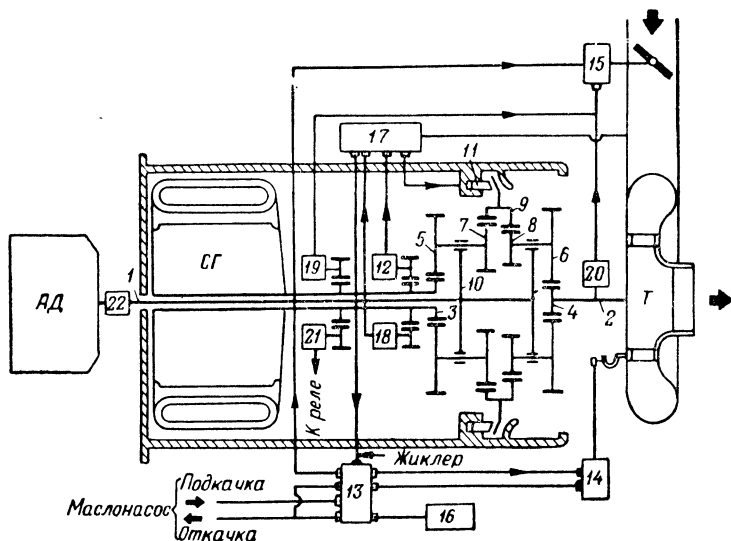


Рис. 2.15. Принципиальная схема пневмомеханического дифференциального привода постоянной скорости с пневмотурбиной:

АД—авиадвигатель; Т—турбина; СГ—синхронный генератор; 1, 2—валы авиадвигателя и турбины; 3, 4—солнечные шестерни генератора и турбины; 5, 6, 7, 8—планетарные шестерни генератора и турбины; 9—кольцевая шестерня; 10—поводок; 11—пневматическая пусковая муфта сцепления; 12—пневматический регулятор скорости; 13—пневмогидравлический сервомеханизм; 14—гидравлический исполнительный механизм; 15—пневматический регулирующий и отсечный клапан; 16—коррекционное устройство; 17—пусковое селекторное электрическое и пневматическое устройство; 18—пневматический выключатель стартера; 19—пневматический выключатель максимальных оборотов генератора; 20—пневматический выключатель максимальных оборотов турбины; 21—пневматический выключатель минимальных оборотов генератора; 22—электрическая муфта сцепления

бины передается к генератору через вращающуюся кольцевую шестерню с внутренним зацеплением и передаточным отношением, соответствующим режиму постоянной скорости. Кинематически передача осуществляется по направлению Т-2-4-6-8-9-7-5-3-СГ.

3. Получение постоянной скорости генератора при передаче мощности от авиадвигателя с регулированием оборотов турбиной. При нормальной работе привода основная часть мощности от авиадвигателя к генератору подводится механическим путем через передачу АД-1-10-5-3-СГ, а регулирование скорости и соответствующая часть мощности обеспечивается турбиной через передачу

Т-2-4-6-8-9-7-5-3-СГ. Турбина работает на воздухе, отбираемом от компрессора авиадвигателя или от скоростного потока.

При изменении скорости вращения авиадвигателя соответственно изменяется скорость вращения кольцевой шестерни 9 за счет планетарной передачи, связанной с солнечной шестерней турбины. Тогда скорость вращения турбины изменяется по команде системы регулирования из условия получения постоянных оборотов генератора.

Система регулирования включает следующие основные элементы:

Пневматический регулятор скорости 12, реагирующий на скорость вращения генератора с помощью центробежного механизма и выдающий пневматический сигнал сервомеханизму.

Пневмогидравлический сервомеханизм 13, воспринимающий сигнал регулятора скорости и выдающий гидравлический сигнал в исполнительный механизм соплового аппарата и пневматический сигнал в регулирующий клапан.

Гидравлический исполнительный механизм 14, получая команду от сервомеханизма, изменяет положение соплового аппарата турбины, чем регулирует скорость вращения турбины, обеспечивая постоянство скорости вращения генератора.

Пневматический регулирующий и отсечной клапан 15, который по команде сервомеханизма регулирует подачу воздуха на вход в турбину, а в аварийном режиме полностью закрывает вход воздуха в турбину.

Коррекционное устройство 16, реагирующее на отклонение частоты и неравномерность загрузки генераторов, включенных на общие шины, и выдающее соответствующий сигнал в сервомеханизм.

Пусковое селекторное электрическое и пневматическое устройство 17.

Пневматический выключатель стартера 18.

При полном диапазоне изменений внешних условий в установленном режиме система регулирования поддерживает частоту генератора с точностью

$\pm 1\%$ без коррекционного устройства
и $\pm 0,1\%$ с коррекционным устройством.

Система предохранительных устройств автоматически вступает в действие при появлении дефектов в системе регулирования скорости и включает следующие основные элементы:

Пневматический выключатель максимальной скорости генератора 19, реагируя с помощью центробежного механизма на превышение максимально допустимой скорости генератора, воздействует на отсечной клапан, перекрывающий доступ воздуха в турбину.

Пневматический выключатель максимальной скорости турбины 20, реагируя с помощью центробежного механизма на превышение максимально допустимой скорости турбины, воздействует на отсечной клапан, перекрывающий доступ воздуха в турбину.

Пневматический выключатель минимальной скорости генератора 21 отключает нагрузку с помощью реле при падении скорости ниже допустимой.

Электрическая муфта сцепления валов привода и авиадвигателя 22, обеспечивающая расцепление валов в аварийных режимах.

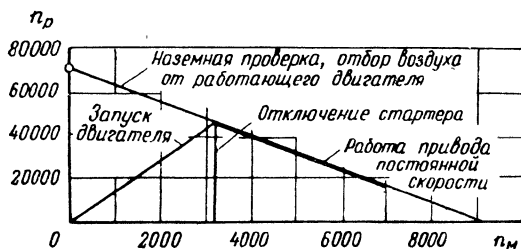


Рис. 2.16. Зависимость оборотов турбины от оборотов двигателя:

n_m — обороты двигателя; n_p — обороты турбины

Турбина привода на эксплуатационных режимах работает при малых оборотах и выход ее из строя за счет превышения скорости вращения маловероятен.

Система передач состоит из простых шестерен, что обеспечивает значительную надежность конструкции.

На рис. 2.16 показан график зависимости скорости вращения турбины от скорости ведущего вала авиадвигателя.

При подводе воздуха от постороннего источника, когда обороты входного вала двигателя равны нулю, турбина работает при постоянной скорости 70 000 об/мин. Привод в этом случае выполняет роль редуктора с выходной скоростью 8000 об/мин.

При запуске авиадвигателя кольцевая шестерня удерживается в неподвижном положении пусковой муфтой. К моменту отключения стартера скорость турбины достигает 46 000 об/мин.

При передаче мощности от работающего авиадвигателя в диапазоне скоростей от малого газа (4000 об/мин) до максимальных оборотов (7000 об/мин), скорость вращения турбины соответственно изменяется от 41 000 до 8200 об/мин.

На рис. 2.17 показан график зависимости выходной мощности генератора от мощности, отбираемой от авиадвигателя через меха-

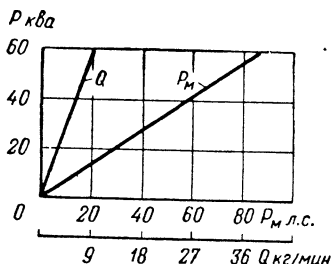


Рис. 2.17. Зависимость выходной мощности генератора от мощности, отбираемой от двигателя (механической и воздушной):

P — мощность, отдаваемая генератором; P_m — механическая мощность, отбираемая от двигателя; Q — расход воздуха, отбираемого от двигателя

нический ведущий вал и количества воздуха, отбираемого от компрессора авиадвигателя и проходящего через турбину. Из графика следует, что при выходной мощности генератора в 30 кВт от авиадвигателя отбирается механическая мощность 42,5 л. с. и воздуха 5 кг/мин.

Средняя величина теплоотдачи в масло составляет 3,4 л. с. (или 34 ккал/мин) для 60 кВт агрегата и 2,4 л. с. (или 24,2 ккал/мин) для 20 кВт агрегата, что приблизительно соответствует одной пятой теплоотдачи в масло для эквивалентного гидравлического привода.

Конструкция привода может быть такой, что распределение мощностей между ведущим валом авиадвигателя и входным валом турбины будет соответствовать температуре воздуха на выходе из турбины около 90° С. Этот воздух может быть использован для охлаждения масла, генератора и других агрегатов.

Привод имеет перспективы:

1. Потенциально возможно применить его в автономной системе охлаждения генератора и масла на скоростных самолетах, используя энергию скоростного напора для регулирования скорости вращения турбины, позволяющей уменьшить температуру воздуха на выходе до необходимого уровня вследствие расширения.

2. Так как привод может работать на воздухе, отбираемом от авиадвигателя, специального двигателя или скоростного напора, то это идеальное устройство для летательных аппаратов с комбинированным турбореактивным двигателем.

3. Привод является идеальным для ядерных силовых установок, так как может осуществлять продолжительную прокрутку двигателя, используя энергию отбираемого воздуха.

§ 10. ПНЕВМОМЕХАНИЧЕСКИЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ ПРИВОД ПОСТОЯННОЙ СКОРОСТИ С ПНЕВМОСТАТИЧЕСКИМ АГРЕГАТОМ РЕГУЛИРОВАНИЯ

На рис. 2.18 показана блок-схема и характеристики пневмомеханического дифференциального привода постоянной скорости с пневмостатическим агрегатом регулирования.

Привод имеет следующие основные элементы:

1. Дифференциальный редуктор.
2. Коловратный пневмодвигатель.
3. Систему регулирования.
4. Систему предохранительных устройств.

Назначение, принцип работы, достоинства и недостатки привода такие же, как и у привода, описанного в § 9. Особенности работы пневмодвигателя очевидны из блок-схемы.

Основная мощность для вращения генератора снимается с вала авиадвигателя с помощью механического редуктора, а пневмостатический (каловратный или объемный) агрегат, управляя частью потребляемой энергии, обеспечивает постоянную скорость вращения генератора.

В пневмостатических агрегатах в основном используется потенциальная энергия воздуха, сжатого компрессором авиадвигателя. В качестве пневмодвигателя может применяться двухроторный коловратный насос, который легко реверсируется, что ведет к снижению его мощности и повышению к. п. д., а его более «жесткая» регулировочная характеристика улучшает параллельную работу.

В коловратных двухроторных насосах соприкосновение роторов между собой и со стенкой корпуса происходит по прямым обра-

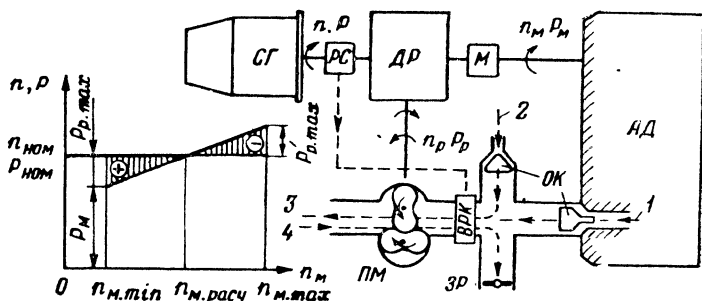


Рис. 2.18. Блок-схема и характеристики пневмомеханического дифференциального привода с пневмостатическим агрегатом регулирования:

ПМ—пневмомотор; ВРК—воздушный регулирующий клапан; ДР—дифференциальный редуктор; ОК—обратный клапан; М—муфта; РС—регулятор скорости; ЗР—заслонка реверса;
1—воздух, отбираемый от компрессора; 2—вход воздуха при запуске, работе на земле и при питании от другого двигателя; 3—выход воздуха: до крейсерского режима, при питании от другого авиадвигателя, при работе на земле и запуске; 4—вход воздуха на крейсерском и выше крейсерских режимах

зующим цилиндра, а не по кривым поверхностям. Вследствие этого уже при небольших неточностях выполнения сборки изнашиваются рабочие поверхности, появляются значительные утечки, изменяется производительность и к. п. д.

Обработка рабочих поверхностей ротора по циклоидам требует высокой точности, что усложняет процесс производства.

На рис. 2.19 и 2.20 показаны общий вид и принципиальная схема пневмомеханического дифференциального привода постоянной скорости фирмы Плесси.

В приводе применена реверсивная схема с использованием дифференциала и объемнопневматической машины типа Рутса. При низком числе оборотов двигателя в эту машину подается сжатый воздух и она работает как мотор, подкручивая генератор. При высоком числе оборотов двигателя объемная машина вращается в обратном направлении и работает как тормоз (компрессор), приводимый от двигателя. При этом она уменьшает скорость вращения генератора, поддерживая ее постоянной.

При работе привода на режимах от малого газа до крейсерского сжатый воздух отбирается за компрессором двигателя 14, проходит воздушный клапан 5 и вращает воздушный мотор 4. От мо-

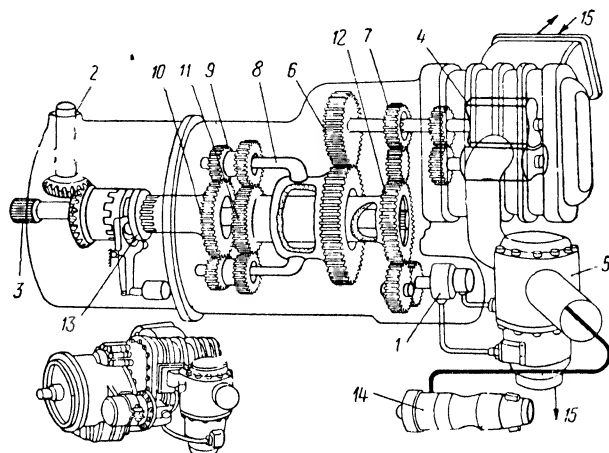


Рис. 2.19. Привод постоянной скорости фирмы Плесси:

1—регулятор числа оборотов; 2—привод от двигателя; 3—выводной вал; 4—воздушный мотор; 5—воздушный клапан; 6—шестерня; 7—шестерня с муфтой включения; 8—водило; 9—планетарная шестерня; 10 и 11—солнечные шестерни; 12—шестерня с муфтой включения; 13—муфта отключения двигателя; 14—двигатель; 15—направление движения воздуха на реверсирном режиме вращения мотора

тора 4 зубчатой передачей 6 движение передается водилу 8. Солнечная шестерня 10 приводится от двигателя, в результате этого шестерня 11 и соединенный с ней выводной вал 3 вращаются с требуемым числом оборотов. По мере увеличения числа оборотов двигателя клапан 5 уменьшает подачу сжатого воздуха к мотору, число оборотов уменьшается и в результате выводной вал продолжает вращаться с прежней скоростью. При этом воздушным клапаном 5 управляет регулятор 1, соединенный с выводным валом 3. Такая работа продолжается до крейсерской точки, т. е. до 75% от максимальной скорости авиадвигателя. В этих условиях к. п. д. привода превышает 90%.

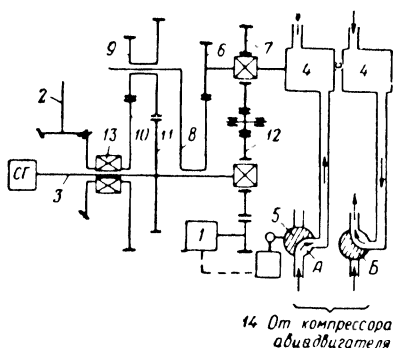


Рис. 2.20. Принципиальная схема ППС с объемным воздушным мотором:

4—моторный режим; Б—тормозной режим

На крейсерском режиме число оборотов воздушного мотора снижается до нуля. При дальнейшем увеличении числа оборотов двигателя воздушный мотор начинает вращаться в противоположном направлении, работая как воздушный тормоз (компрессор). Направление движения воздуха при этом меняется на обратное. В этом случае клапан 5 отключает магистраль, ведущую от двигателя, и перепускает воздух, идущий от мотора Рутса в атмосферу.

Таким образом от крейсерской скорости до максимальной не требуется отбор воздуха от компрессора авиадвигателя, а вся мощность на вращение генератора берется от авиадвигателя механическим путем, что обеспечивает наилучшую экономичность системы. Благодаря низкой инерции и малой постоянной времени двигателя этого типа достигается хорошее регулирование частоты и параллельной работы генераторов.

При запуске авиадвигателя сжатый воздух от наземного источника или отбираемый от компрессора уже запущенного двигателя приводит во вращение воздушный мотор 4. Муфта 7 автоматически включается, и двигатель раскручивается от воздушного мотора с помощью шестерен 7-12-11-9-10. При определенных оборотах муфта отключается и агрегат переходит в режим привода постоянной скорости.

При работе привода на неработающем авиадвигателе на земле муфта 13 отключает привод от авиадвигателя. Сжатый воздух от наземного источника подводится к воздушному мотору 4. Привод осуществляется простым редуктором из шестерен 7 и 12, имеющим постоянное передаточное отношение между пневмодвигателем и генератором. Воздушный клапан 5 поддерживает постоянной расчетную скорость генератора.

Если один из авиадвигателей вышел из строя, то, вращая привод от постороннего источника, можно получить энергию от установленного на нем генератора. Для этого муфтой 13 привод отключается от двигателя, а воздушный мотор питается воздухом, отбираемым от других двигателей. Схема работы привода такая же, как и на земле при неработающем авиадвигателе.

Достоинства. 1. При оборотах авиадвигателя свыше 0,75 от максимальных (практические скорости полета) привод не отбирает воздух от компрессора авиадвигателя и имеет к. п. д. более 0,9, обеспечивая высокую экономичность.

2. В приводе почти отсутствует тепловыделение.

3. Автономная маслосистема регулятора и смазки повышает надежность.

4. Прочность редуктора определяется стартерным режимом, поэтому допустима установка более мощного генератора и электрическая перегрузка.

5. Привод позволяет производить отладку электрических систем на земле без запуска авиадвигателя.

§ 11. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРИВОДЫ ПОСТОЯННОЙ СКОРОСТИ

Электромеханические приводы можно представить двумя типами: простыми и дифференциальными. В качестве примеров рассмотрим электромагнитную муфту скольжения, электромагнитный тормоз и комбинированный привод.

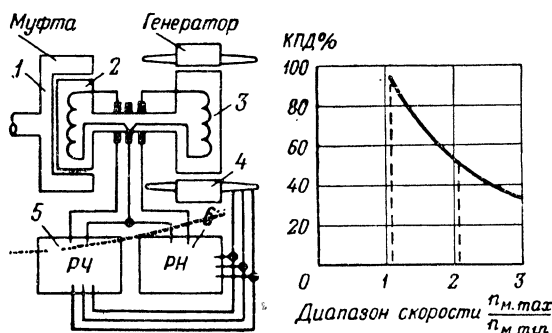


Рис. 2.21. Схема привода постоянной скорости с электромагнитной муфтой скольжения

Электромагнитная муфта скольжения, представленная на рис. 2.21, состоит из ведущей части 1, связанной с валом авиадвигателя, и ведомой части 2, находящейся на одном валу с ротором синхронного генератора 3, расположенного внутри статора 4.

Обмотка возбуждения электромагнитной муфты находится на ведомой части 2 и питается постоянным током через регулятор частоты.

Обмотка возбуждения синхронного генератора расположена на роторе 3 и питается постоянным током через регулятор напряжения 6, который автоматически изменяя величину тока возбуждения, стабилизирует выходное напряжение генератора.

В электромагнитной муфте скольжения отсутствуют элементы трения, а ее механические характеристики (рис. 2.22) аналогичны характеристикам асинхронной машины. Из характеристик очевидно, что при изменении тока возбуждения муфты (аналогично изменению напряжения на зажимах асинхронной машины) изменяется характер механической характеристики $M=f(n)$.

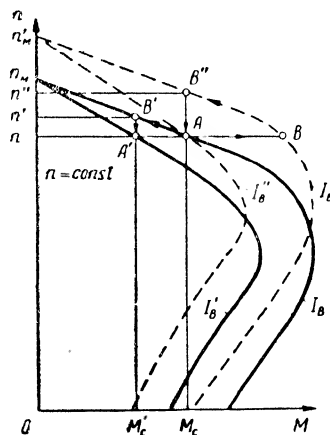


Рис. 2.22. Механические характеристики электромагнитной муфты скольжения

Отклонение скорости вращения генератора n от номинальной может произойти в результате изменения активной нагрузки генератора, т. е. изменение тормозного момента M_c , или изменения скорости вращения первичного двигателя n_m .

Допустим, что активная нагрузка генератора уменьшилась, тогда соответственно снижается момент сопротивления с M_c до M'_c . При неизменной скорости n_m первичного двигателя скорость генератора возрастает до n' . Для сохранения скорости генератора неизменной автоматический регулятор частоты уменьшает ток возбуждения муфты с I_b до I'_b , т. е. на такую величину, при которой механическая характеристика пройдет через точку A' , расположенную на линии $n = \text{const}$.

Допустим, что скорость первичного двигателя возросла с n_m до n'_m , тогда механическая характеристика, сохраняя свою форму, сместится вверх на $n'_m - n_m$ и скорость генератора возрастет до n'' . Для сохранения скорости генератора неизменной регулятор частоты уменьшает возбуждение с I_b до I''_b , т. е. настолько, чтобы механическая характеристика прошла через точку A .

Таким образом, при изменении скорости первичного двигателя или активной мощности генератора (M_c), скорость вращения ротора синхронного генератора поддерживается постоянной путем регулирования тока возбуждения электромагнитной муфты с помощью автоматического регулятора частоты.

В установленном режиме на ведущую и ведомую части муфты действует один и тот же электромагнитный момент M , который не зависит от скорости вращения, хотя она и различна. Мощность, подводимая к муфте, $P_m = n_m M$, а мощность, отбираемая от муфты, $P = n M$. Разность мощностей составляет потери скольжения муфты:

$$\Delta P = P_m - P = M(n_m - n).$$

Из формулы очевидно, что с увеличением диапазона изменения скорости вращения авиадвигателя возрастают потери в муфте и снижается ее коэффициент полезного действия. Минимальный к. п. д. муфты определяется как

$$\eta_{\min} = \frac{P}{P + \Delta P_{\max}} = \frac{Mn}{Mn + M(n_{m \max} - n)} = \frac{n}{n_{m \max}}.$$

Если не учитывать минимальное скольжение, равное 3—5%, то приближенно можно считать, что $n \approx n_{m \min}$, тогда $\eta_{\min} \approx \frac{n_{m \min}}{n_{m \max}}$.

Таким образом, к. п. д. системы с электромагнитной муфтой скольжения обратно пропорционален диапазону изменения скорости вращения авиадвигателя.

Основным недостатком электромагнитной муфты является то, что вся энергия скольжения выделяется в муфте в виде тепла. Из графика, приведенного на рис. 2.21, видно, что с ростом диапазона

изменения скоростей первичного двигателя к. п. д. резко падает, и при диапазоне 2:1 половина всей энергии должна рассеиваться в виде тепла. Это вызывает увеличение веса и мощности системы охлаждения. Поэтому электромагнитные муфты могут найти применение только при небольшом диапазоне изменения скоростей авиадвигателей, например у ТВД.

Электромагнитный тормоз. В таких приводах постоянной скорости используется дифференциальный механизм и электромагнитный тормоз. Один из возможных вариантов схемы представлен на рис. 2.23. Валы дифференциала соединяются: 1 — с авиадвигателем, 2 — с генератором и 3 — с электромагнитным тормозом.

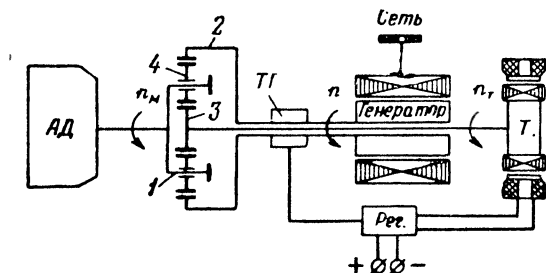


Рис. 2.23. Принципиальная схема привода постоянной скорости с электромагнитным тормозом и дифференциалом.

Передаточное отношение подбирается таким образом, чтобы на режиме земного малого газа (минимальное устойчивое число оборотов двигателя) при неподвижном электромагнитном тормозном устройстве (в действительности тормоз медленно вращается для управления тормозным моментом) число оборотов генератора переменного тока соответствовало бы расчетному. При увеличении числа оборотов двигателя возрастает негативная скорость вращения тормоза (регулируется нагрузкой) и таким образом сохраняется постоянство скорости вращения генератора переменного тока. При этом мощность от двигателя передается как к генератору, так и к тормозному устройству.

Потери на скольжение и к. п. д. электромагнитного тормоза так же как в электромагнитной муфте изменяются обратно пропорционально диапазону скоростей авиадвигателя. Поэтому по тем же причинам применение электромагнитного тормоза имеет смысл лишь при небольшом диапазоне изменения скорости вращения авиадвигателя.

Электромагнитный тормоз по сравнению с электромагнитной муфтой имеет меньшие размеры, особенно при малом диапазоне скоростей. Так, по данным [1], при диапазоне скоростей вращения 1,1—1,2 размеры тормоза в 5—15 раз меньше размеров генератора.

ра и соответствующей муфты. Однако при этом следует учитывать дополнительный вес и конструктивную сложность дифференциала.

В комбинированном электромеханическом приводе, представленном на рис. 2.24, в качестве регулирующего органа используется электромагнитная муфта, работающая в режимах докрутки и торможения. Переключает электромагнитную муфту с одного режима на другой специальная муфта сцепления, которая в обесточенном состоянии обеспечивает режим торможения, а под током — сцепление для режима докрутки. Наличие двух режимов снижает потери в электромагнитной муфте.

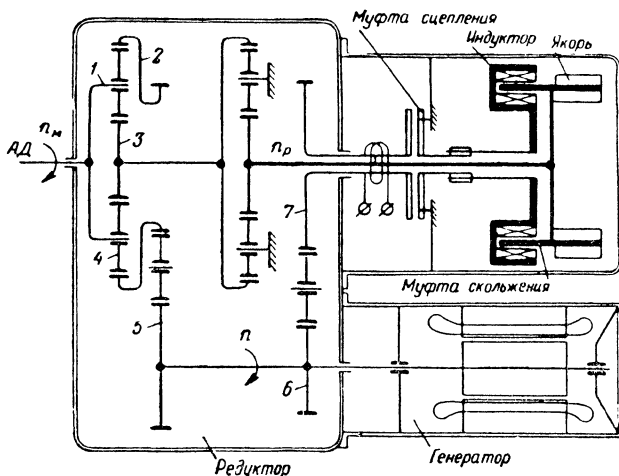


Рис. 2.24. Принципиальная схема комбинированного электромеханического привода постоянной скорости

В приводе ведущим является водило 1, связанное с авиадвигателем. Вращение от авиадвигателя к генератору передается через передачу 1—4—2—5. Колесо 3 связано с якорем электромагнитной муфты. Индуктор электромагнитной муфты может устанавливаться муфтой сцепления в неподвижное положение или подключаться на вращение от вала генератора через передачу 6—7.

Режим докрутки. При оборотах малого газа муфта сцепления механически соединяет индуктор электромагнитной муфты с валом генератора. Индуктор, получая вращение и соответствующее возбуждение, наводит э. д. с. в якоре. Вращающееся магнитное поле якоря, взаимодействуя с полем индуктора, приводит во вращение якорь и соответственно колесо 3, которое через сателлит 4 увеличивает обороты генератора до постоянных.

Режим торможения. При оборотах авиадвигателя, близких к крейсерским, когда скорость вращения генератора приближается к номинальной, муфта сцепления обесточивается и фиксирует индуктор в неподвижном положении. В этом случае колесо 3 вращает

якорь в неподвижном магнитном поле индуктора. Вращающееся магнитное поле якоря, взаимодействуя с полем индуктора, которое регулируется соответствующим током возбуждения, тормозит вращение колеса 3. С увеличением скорости вращения авиадвигателя эффект торможения возрастает и передается через сателлит 4 к колесу 2, связанному с генератором. Генератор получает постоянную скорость вращения.

Комбинированный привод обладает недостатками, отмеченными выше для электромагнитной муфты и тормоза. Правда, переключе-

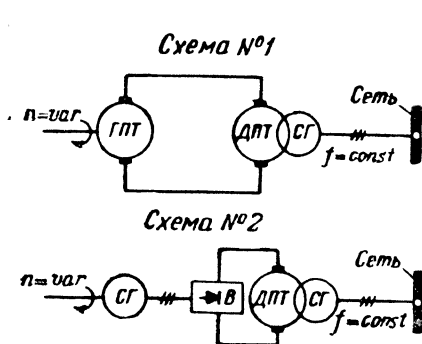


Рис. 2. 25. Типовые схемы простого электрического привода постоянной скорости:

ГПТ—генератор постоянного тока; ДПТ—двигатель постоянного тока; СГ—синхронный генератор; В—выпрямитель

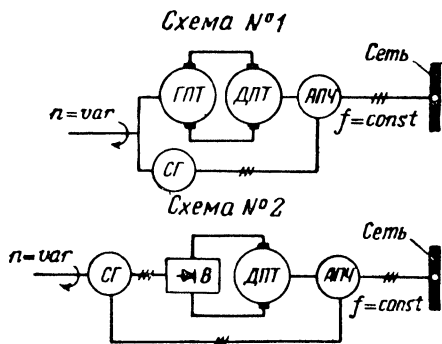


Рис. 2. 26. Типовые схемы дифференциального электрического привода:

АПЧ—асинхронный преобразователь частоты (асинхронная машина двустороннего питания); ГПТ—генератор постоянного тока; ДПТ—двигатель постоянного тока; СГ—синхронный генератор; В—выпрямитель

чающее устройство несколько снижает потери скольжения и повышает к. п. д. Однако его применение имеет практический смысл только при узком диапазоне скорости вращения авиадвигателя.

В электрических приводах постоянной скорости механическая энергия от авиадвигателя предварительно преобразуется в электрическую.

В простых электрических приводах постоянной скорости, показанных на рис. 2. 25, вся мощность, генерируемая каскадом, проходит через все машины.

Наиболее перспективной является схема № 2. В этой схеме бесконтактный генератор переменного тока через редуктор получает механическую энергию от авиадвигателя и вместе с выпрямителем преобразует ее в электрическую энергию постоянного тока, которая используется для вращения с постоянной скоростью одноякорного преобразователя, выдающего переменный ток постоянной частоты.

В дифференциальных электрических приводах постоянной скорости, показанных на рис. 2. 26, мощность, генерируемая каскадом, поступает по двум параллельным путям, которые сходятся в особой машине, выполняющей роль смесителя.

Смесителем скоростей (мощностей) в дифференциальных схемах служит асинхронный преобразователь частоты АПЧ.

Регулирование частоты каскада при изменении скорости авиадвигателя или нагрузки сети производится путем изменения возбуждения двигателя постоянного тока или возбуждения питающего этот двигатель генератора.

Относительный вес приводов согласно данным [1] довольно высок— $3 \div 3,5$ кг/кВа, к. п. д. относительно низок— $0,55-0,75$, а наличие коллектора у одной или двух машин каскада снижает надежность энергоснабжения.

Электрический привод может найти применение лишь при узком диапазоне скоростей вращения авиадвигателя.

Выводы

1. Для получения постоянной частоты генераторов переменного тока применяются механические, гидравлические, пневматические и электрические приводы постоянной скорости.

2. Приводы постоянной скорости классифицируются на простые и дифференциальные. К. п. д. и экономичность дифференциального привода выше простого, причем эти параметры улучшаются с применением реверсивной схемы регулирования.

3. Механические приводы имеют высокие контактные давления между торондами и роликом, достигающие $30\,000$ кг/см²; требуют специальной смазки, обеспечивающей высокий коэффициент трения между роликом и торондами, и хорошей смазки остальных деталей; сложны в изготовлении.

4. Гидромеханические приводы в сравнении с пневмомеханическими имеют более сложную конструкцию и тяжелый запуск при низких температурах, требуют абсолютной герметичности, чистоты и охлаждения жидкости. Широкое распространение получили дифференциальные гидромеханические приводы с реверсивной схемой регулирования.

5. Пневмомеханические приводы по конструктивному исполнению проще соответствующих гидромеханических, не требуют абсолютной герметичности, так как утечки воздуха не представляют опасности, не требуют обогрева и охлаждения. Отработанный воздух может использоваться для охлаждения генератора и других агрегатов, что особенно важно на сверхзвуковых л. а.

Приводы изготавливаются в комбинированном варианте, обеспечивающем постоянство скорости вращения генератора на всех режимах работы двигателей и запуск двигателей на земле.

Практическое распространение получили дифференциальные приводы с прямой или реверсивной схемой регулирования.

В прямой схеме для регулирования используется турбина, которая только увеличивает скорость вращения.

Турбина рассчитывается на минимальный энергетический уровень воздуха, отбираемого от авиадвигателя, и, следовательно,

Таблица 2.1

Основные параметры некоторых приводов постоянной скорости иностранных самолетов

Наименование привода	Тип привода	Мощность генератора, <i>квт</i>	К.п.д.	Вес		Обороты		Точность частоты		Срок службы	Тип самолета
				агрегата	полетный	входа	выхода	без корректора	с корректором		
<i>кг</i>		<i>10³.об/мин</i>		<i>%</i>		<i>час</i>					
Механический фрикционный	Хейсс	30	0,85	40		3—10	8			800	
Гидромеханический с гидравлическим дифференциалом	Сандстренд	40		38,5		3—10,5	6	$\pm 0,5$	$\pm 0,25$	1000	Боинг 707, 720 и 727 ДС-8, VC-10
Гидромеханический с гидравлическим дифференциалом	Дженерал Электрик	40		22,7		4—8,3	6	± 1	$\pm 0,25$		Конвер 880 и 990
		20		15,8		4—8,3	8	± 1	$\pm 0,25$		C-141
Гидромеханический	Гобсон	22,5		36		4—8,3	8	± 1			ДН-121
Пневмомеханический с турбиной	Эрнсерч	60				3,2—9	8	± 1	$\pm 0,1$		Военные самолеты
		20				3,2—9	8	± 1	$\pm 0,1$		
Пневмомеханический с реверсивным пневмомотором	Плесси	30	$< 0,9$	51		2,62—4,55		± 1		2000—4000	БАК-111 Военные самолеты
		48 max									
		60 70 max	$< 0,9$	50		2,6—4,85		± 1		2000—4000	

оказывается переразмеренной на других режимах работы, что приводит к снижению к. п. д. и к некоторой потере тяги авиадвигателя. К. п. д. привода переменный и достигает максимальной величины 0,8—0,85 при оборотах 0,8—0,85 от номинальных.

В реверсивной схеме для регулирования применяются объемно-пневматические машины типа Рутса и другие, дающие в сравнении с турбиной более высокий к. п. д. и меньший дополнительный расход горючего, но более сложные в изготовлении.

6. Для большинства двигателей отбор механической мощности экономически выгоднее, чем отбор сжатого воздуха. Однако сравнительные характеристики существенно зависят от условий полета и нагрузки. Поэтому сравнение лучше вести по расходу топлива с учетом всего расписания полета. Так, например, дополнительный расход топлива при полном отборе мощности от привода в типичной программе полета:

для гидромеханического привода 0,07—0,1 кг/кв.а · час;

для пневматического с турбиной 0,1—0,2 кг/кв.а · час.

7. У электромеханических приводов передаточное отношение подбирается из расчета земного малого газа. По мере увеличения скорости возрастает мощность потерь. При изменении скорости авиадвигателя в два раза к. п. д. доходит до 50 %, что требует большой мощности для охлаждения.

8. Приводы (в зависимости от типа) по разному реагируют на перегрузки. Гидромеханический привод, рассчитанный на номинальную нагрузку, выдерживает 100 %-ную перегрузку в течение 5 сек за счет временного увеличения давления жидкости, тогда как механические и пневмомеханические приводы должны рассчитываться с учетом перегрузки.

Практически механический привод работает на 50 % от расчетной нагрузки, что ухудшает его эффективность. Пневматический привод должен выдерживать перегрузку при наиболее неблагоприятных параметрах сжатого воздуха и, следовательно, воздушная машина во всех остальных режимах будет переразмерена.

В табл. 2.1 приведены основные параметры некоторых приводов постоянной скорости иностранных самолетов.

Глава III

РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ГЕНЕРАТОРОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

§ 1. ОСОБЕННОСТИ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ

Система регулирования напряжения синхронных генераторов решает следующие задачи:

1. Поддерживает напряжение генераторов на заданном уровне с требуемой степенью точности при изменении величины и характера нагрузки путем воздействия на ток возбуждения.

2. Обеспечивает устойчивость параллельной работы и равномерное распределение реактивных мощностей между генераторами путем воздействия на их возбуждение в зависимости от величины и характера нагрузки. Поддержание одинаковых коэффициентов мощности ($\cos \varphi$) снижает способность генераторов к перегрузке реактивным током и дополнительные потери в меди.

3. Сохраняет устойчивость параллельной работы генераторов при коротких замыканиях форсированием возбуждения.

При разработке принципиальных электросхем системы регулирования напряжения следует учитывать ряд специфических условий:

1. Синхронные генераторы в сравнении с генераторами постоянного тока требуют в 2—3 раза большую мощность для возбуждения. Это сопряжено с рядом трудностей при регулировании напряжения путем непосредственного воздействия на цепь возбуждения и вызывает необходимость в дополнительной машине для возбуждения.

2. Степень несимметрии напряжений не должна превышать 5%, так как последняя вызывает токи обратной последовательности, дополнительные потери мощности и значительное снижение допустимой нагрузки генератора.

3. При несимметричных нагрузках возникают затруднения в выборе оптимального напряжения (линейного, фазного, среднего или прямой последовательности), на которое должен реагировать чувствительный элемент регулятора.

§ 2. СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА РЕГУЛЯТОРА НАПРЯЖЕНИЯ

Включение чувствительного элемента РН непосредственно на линейное или фазное напряжение

На рис. 3.1 представлена схема включения чувствительного элемента РН непосредственно на линейное напряжение и векторные диаграммы напряжений при симметричной и несимметричной нагрузках.

Из векторной диаграммы очевидно, что при несимметричной нагрузке линейные напряжения искажаются, т. е. U_{AC} возросло, а U_{AB} и U_{BC} уменьшились. Если чувствительный элемент РН подключить на повышенное линейное напряжение (U_{AC}), то регулятор занизит напряжение генератора, а включение на пониженное напряжение приведет к завышению напряжения генератора. Аналогичные явления будут и при использовании для этой цели фазных напряжений.

Таким образом, при несимметричной нагрузке фаз включение чувствительного элемента РН непосредственно на линейное или фазное напряжение генератора через выпрямитель не обеспечивает необходимого регулирования напряжения вследствие искажения треугольника линейных и фазных напряжений генератора.

Включение чувствительного элемента РН на среднее напряжение

Включение чувствительного элемента РН через трехфазную двухполупериодную выпрямительную схему на среднее напряе-

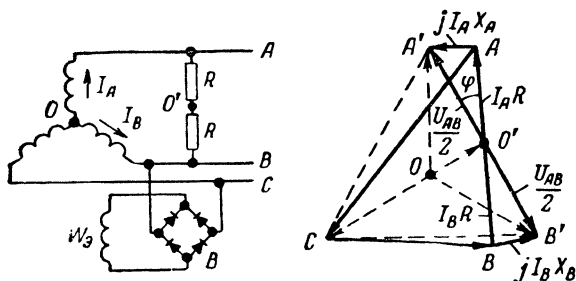


Рис. 3.1. Схема и векторная диаграмма включения чувствительного элемента РН на линейное напряжение

ние генератора представлено на рис. 3.2. На векторной диаграмме напряжений генератора сплошные линии соответствуют симметричной нагрузке, а пунктирные — несимметричной нагрузке.

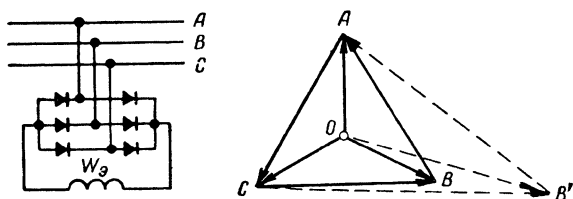


Рис. 3.2. Схема и векторная диаграмма включения чувствительного элемента РН на среднее напряжение

Как известно, среднее значение выпрямленного напряжения трехфазного двухполупериодного выпрямителя пропорционально периметру многоугольника приложенных линейных напряжений:

$$U_{\text{выпр.ср}} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} (U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}),$$

где U_{AB} , U_{BC} и U_{CA} — эффективные значения соответствующих линейных напряжений. Если линейные напряжения генератора одинаковы, т. е. $U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = \sqrt{3}U_{\phi}$, то напряжение на выходе выпрямителя

$$U_{\text{выпр.ср}} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} U_{\phi} = 2,34 U_{\phi}.$$

Очевидно, степень несимметрии и характер несимметричной нагрузки, определяющей сдвиг между основными векторами напряжений прямой и обратной последовательности, будут оказывать влияние на величину среднего выпрямленного напряжения. Однако, как показывают исследования в [10], несимметрия линейных напряжений до 5% вызывает погрешность выпрямленного напряжения не более 0,1%, что практически допустимо для системы регулирования напряжения. Величина выпрямленного тока не зависит от частоты, что является положительным фактором схемы, поэтому она получила наибольшее практическое применение.

Включение чувствительного элемента РН через фильтр напряжения —прямой последовательности

Режим работы синхронного генератора в основном определяется прямой последовательностью векторов фазовых и линейных напряжений, поэтому при несимметричной нагрузке наиболее совершенной схемой включения регулятора напряжения является схема, в которой чувствительный элемент реагирует на напряжение прямой последовательности.

Для выделения напряжения прямой последовательности применяются различные схемы фильтров. Наиболее целесообразно для этой цели использовать линейные напряжения, так как они всегда образуют замкнутый треугольник и, следовательно, не имеют составляющей нулевой последовательности.

В системе линейных напряжений $\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$ напряжение прямой последовательности определяется формулой

$$\dot{U}_1 = -\frac{\dot{U}_{BC}e^{-j30^\circ} + \dot{U}_{CA}e^{+j30^\circ}}{\sqrt{3}} = -\frac{e^{-j30^\circ}}{\sqrt{3}} [\dot{U}_{BC} + \dot{U}_{CA}e^{+j60^\circ}].$$

Из формулы очевидно, что для получения напряжения прямой последовательности необходимо сложить векторы, пропорциональные $\dot{U}_{BC}$ и $\dot{U}_{CA}$, повернув их соответственно на -30° и $+30^\circ$. Это выполняется посредством фильтров, одна из схем и векторная диаграмма которых приведена на рис. 3.3.

Если подобрать элементы фильтра X_L, R_1, R_2 и X_C так, чтобы вектор тока $\dot{I}_1$ отставал от вектора напряжения $\dot{U}_{BC}$ на 30° , а вектор тока $\dot{I}_2$ опережал вектор напряжения $\dot{U}_{CA}$ на 30° , то вектор $\dot{I}_1 R_1$, пропорциональный линейному напряжению $\dot{U}_{BC}$, будет сдвинут относительно вектора $\dot{I}_2 R_2$, пропорционального линейному напряжению $\dot{U}_{CA}$, на 60° , а суммарный вектор $\dot{U}_{ED}$ будет пропорционален напряжению прямой последовательности $\dot{U}_{ED} = K\dot{U}_1$.

Таким образом чувствительный элемент регулятора напряжения следует подключить к точкам D и E фильтра напряжения прямой последовательности.

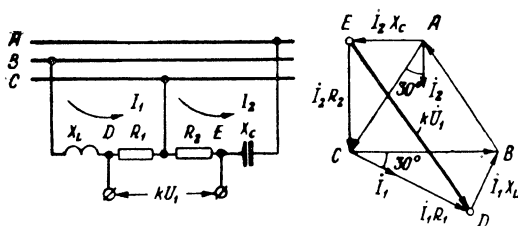


Рис. 3.3. Принципиальная схема и векторная диаграмма фильтра напряжения прямой последовательности

Фильтры прямой последовательности могут использоваться при строго постоянной частоте генератора, так как в противном случае фильтр даст большие искажения из-за изменения сопротивлений X_L и X_C .

§ 3. АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПЯЖЕНИЯ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Напряжение синхронных генераторов автоматически регулируется с помощью угольных или бесконтактных регуляторов напряжения.

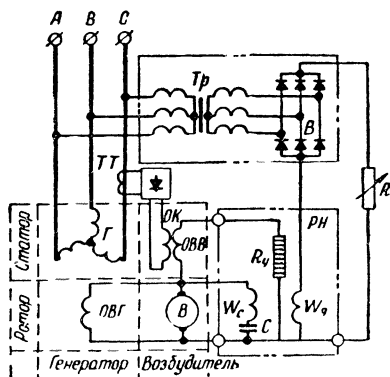


Рис. 3.4. Схема включения угольного регулятора напряжения синхронного генератора, возбуждаемого от возбудителя

В зависимости от схемы генератора регулятор напряжения воздействует непосредственно на ток возбуждения генератора или на ток возбуждения возбудителя.

Угольные регуляторы напряжения. У синхронных генераторов, имеющих в качестве возбудителя генератор постоянного тока, автоматическое регулирование напряжения может осуществляться по схеме, приведенной на рис. 3.4.

В качестве чувствительного элемента используется непосредственно рабочая обмотка W_0 угольного регулятора, которая подключена на среднее линейное

напряжение генератора через трехфазный трансформатор и двухполупериодный выпрямитель.

Для увеличения устойчивости регулирования напряжения применена гибкая обратная связь, состоящая из конденсатора C и дополнительной обмотки W_c , образующих стабилизирующий контур.

При значительном изменении нагрузки генератор может оказаться в режиме нерабочего участка характеристики регулятора, вследствие чего возможно сильное понижение или повышение напряжения. Для исключения таких явлений иногда применяется автоматическое компаундирование при помощи трансформатора тока ТТ, посылающего в корректирующую обмотку возбуждения генератора или возбудителя дополнительный ток возбуждения, пропорциональный току нагрузки. Компаундирующий ток во всех случаях противодействует изменениям напряжения на зажимах генератора и тем самым облегчает условия устойчивости работы регулятора.

Бесконтактные регуляторы напряжения с магнитными усилителями являются наиболее перспективными с точки зрения стабильности работы, повышения точности, надежности и удобства эксплуатации. Такие регуляторы получили распространение главным образом для регулирования возбуждения бесконтактных синхронных генераторов или их возбудителей. Они с успехом могут применяться вместо угольных регуляторов напряжения в комплекте с обычными синхронными генераторами.

На рис. 3.5 представлена принципиальная схема бесконтактного регулятора напряжения с двухкаскадным магнитным усилителем МУ1 и МУ2.

Чувствительным элементом является измеритель напряжения ИН, подключенный на линейное напряжение генератора. Он состоит из насыщенного дросселя Др с нелинейной характеристикой, выходной ток с которого поступает в обмотку управления W_{y1} магнитного усилителя МУ1.

Выбор рабочей точки на характеристике магнитного усилителя МУ1 осуществляется цепью смещения $W_{см1}$, которая по существу играет роль линейного канала измерителя напряжения. Обмотка смещения $W_{см2}$ служит для выбора рабочей точки на характеристике МУ2 и самовозбуждения генератора.

Магнитные усилители выполнены с внутренней обратной связью, а выходной усилитель, включенный на обмотку возбуждения генератора, снабжен также дополнительной внешней обратной связью, что дает возможность значительно повысить коэффициент усиления при одновременном уменьшении числа витков управляющей обмотки и улучшить динамические свойства регулирования.

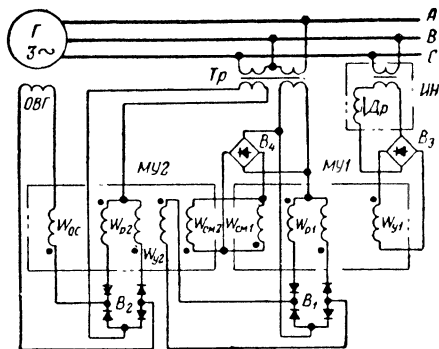


Рис. 3.5. Принципиальная схема бесконтактного регулятора напряжения с двухкаскадным магнитным усилителем

Режимы работы магнитных усилителей подобраны таким образом, чтобы при возрастании управляющего сигнала первого усилителя его выходной ток возрастал, а при возрастании управляющего сигнала второго усилителя, наоборот, уменьшался. Это дает возможность взаимно компенсировать смещение характеристик усилителей, имеющее место при колебаниях температуры и частоты питающего напряжения.

При номинальном напряжении генератора через обмотки $W_{см1}$ и W_{y1} протекают одинаковые токи, создающие равные по величине

встречные подмагничивающие поля. При отклонении напряжения генератора от номинального значения выходной ток в цепи насыщенного дросселя Др, в которую включена обмотка управления W_{y1} , изменяется на большую величину в сравнении с током обмотки смещения $W_{см1}$. Величина тока в обмотке управления W_{y1} определяет величину и направление результирующего магнитного потока и выходного сигнала МУ1.

Выходной сигнал с магнитного усилителя МУ1 поступает в обмотку управления W_{y2} . Магнитный усилитель МУ2 изменяет соответственно ток в обмотке возбуждения генератора ОВГ, восстанавливая напря-

жение генератора до номинального значения.

Регулятор, выполненный по такой схеме, обладает достаточно высоким быстродействием и точностью регулирования порядка $\pm 2\%$.

На рис. 3.6 представлена типовая принципиальная схема бесконтактного регулятора напряжения с однокаскадным магнитным усилителем. Схема регулятора дана для бесконтактного синхронного генератора.

Чувствительным элементом регулятора является измеритель напряжения ИН, включенный через выпрямитель В на среднее напряжение генератора. ИН представляет собой измерительный мост, в одно из плеч которого включен стабилитрон СТ. Мост сбалансирован так, что при номинальном напряжении генератора напряжение на его выходе равно нулю. Выход ИН включен на обмотку управления W_y магнитного усилителя МУ. Направление тока в обмотке управления определяется знаком рассогласования по напряжению.

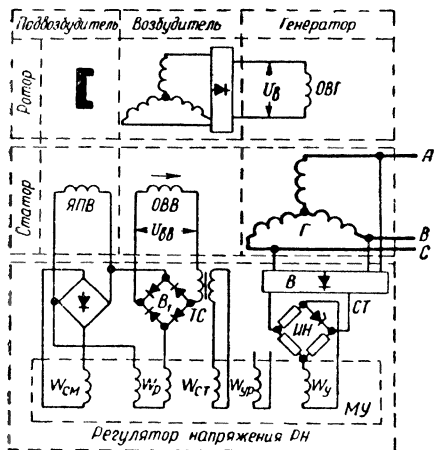


Рис. 3.6. Принципиальная схема бесконтактного регулятора напряжения с однокаскадным магнитным усилителем

Обмотка смещения $W_{\text{см}}$ и рабочая обмотка $W_{\text{р}}$ магнитного усилителя питаются от обмотки якоря подвозбудителя ЯПВ.

Таким образом, работа регулятора представляется в следующем виде: отклонение напряжения генератора от номинальной величины обнаруживает ИН, который соответственно изменяет ток в обмотке управления W_y магнитного усилителя, последний изменяет ток в обмотке возбуждения возбuditеля ОВВ. Возбудитель генератора ОВГ, восстановит номинального значения.

На рис. 3.8 приведена принципиальная схема бесконтактного регулятора напряжения, состоящего из измерителя напряжения ИН, магнитных усилителей МУ1 и МУ2 и измерителя реактивной мощности ИРМ.

Подвоздушитель

Домор

Воздушитель

Генератор

Г

ТТ

Сматр

Регулятор напряжения РН

изменяя ток в обмотке возбуждения
ивает напряжение генератора до номи-

схема управления в усилителе МЭ 1.



каскадным магнитным усилителем и корректором реактивной мощности

рования.

По уравнивательной обмотке $W_{\text{у}}^{\text{р}}$ протекает ток, пропорциональный разности реактивных токов параллельно работающих генераторов. Напряжение на эту обмотку снимается с выходного сопротивления измерителя реактивной мощности (ИРМ).

Трехфазный магнитный усилитель МУ2 выполнен с внутренней обратной связью. Его рабочие обмотки $W_{\text{р}}$ получают питание от сети подвозбудителя, а обмотка управления $W_{\text{у}}$ от выходного напряжения магнитного усилителя МУ1.

Обмотка смещения $W_{\text{см}}$ включена на линейное напряжение подвозбудителя через трехфазный выпрямитель и служит для согласования характеристик усилителей и самовозбуждения подвозбудителя.

Нагрузкой магнитного усилителя МУ2 является обмотка возбуждения возбудителя ОВВ.

Применение двухкаскадного усилителя позволяет увеличить быстродействие схемы регулирования напряжения, т. е. снизить постоянную времени, которая пропорциональна коэффициенту усиления мощности.

При увеличении напряжения генератора выше номинального (сброс нагрузки) выходной ток с измерительного моста возрастает; усилители уменьшают ток возбуждения возбудителя, при этом соответственно снижается напряжение генератора.

При уменьшении напряжения (включение нагрузки) происходит обратное явление.

Глава IV

ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ГЕНЕРАТОРОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

§ 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЕ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Параллельная работа генераторов в сравнении с отдельной имеет ряд преимуществ:

1. Повышается надежность электроснабжения потребителей, так как при выходе из строя нескольких генераторов нормальное питание не нарушается.

2. Снижается установленная мощность резерва, необходимая для питания потребителей при отказе некоторых генераторов.

3. Обеспечивается запуск и нормальная работа потребителей, превосходящих по мощности отдельно взятый генератор.

4. Улучшается качество электрической энергии, так как повышается стабильность напряжения и частоты в сети, особенно при запуске мощных электродвигателей.

Особенности условий работы. Параллельная работа авиационных генераторов в отличие от наземных имеет характерные особенности:

1. Мощность генератора составляет 0,5—2% от мощности авиадвигателя.
2. Большой диапазон изменения скоростей авиадвигателей (1 : 3 и более).
3. Различие величин скоростей параллельно работающих авиадвигателей при одном и том же режиме полета.
4. Большие ускорения при изменении скорости авиадвигателя.
5. Независимость регулирования двигателей от режима работы генераторов.

Условия включения на параллельную работу. При включении синхронных генераторов на параллельную работу необходимо равенство э. д. с. и частот, совпадение фаз э. д. с. и последовательности фаз подключаемого генератора и сети.

Приведение синхронных генераторов в состояние, удовлетворяющее перечисленным требованиям, называется синхронизацией генераторов.

Устойчивость параллельной работы синхронных генераторов обеспечивается при выполнении следующих условий:

1. Для синхронизации необходима одинаковая и равномерная скорость вращения генераторов и достаточно высокая синхронизирующая мощность.
2. У генераторов с приводами постоянной скорости или с двигателями соизмеримой мощности должны приниматься меры, исключающие возможность возникновения качания генераторов.
3. Должны быть одинаковые и синусоидальные кривые э. д. с., обеспечивающие отсутствие уравнительных токов высших гармоник, ухудшающих устойчивость работы машин и вызывающих добавочные потери в них.

Различают два основных режима работы:

1. Параллельная работа генератора с сетью бесконечно большой мощности, когда изменение режима работы одного генератора (изменение возбуждения или нагрузки) не оказывает влияния на напряжение и частоту сети.
2. Параллельная работа генератора с сетью сравнимой мощности, когда изменение режима работы генератора оказывает влияние на напряжение и частоту сети.

Распределение нагрузок. При параллельной работе генераторов активная и реактивная нагрузки должны распределяться пропорционально их номинальным мощностям, т. е. генераторы равной мощности должны работать с одинаковой нагрузкой и при одинаковом коэффициенте мощности, равному коэффициенту мощности нагрузки. В этом случае энергосистема развивает мощность, равную сумме мощностей генераторов, входящих в систему, при минимальных потерях.

При неравномерном распределении активной или реактивной нагрузки номинальная мощность системы не используется, так как допустимая предельная мощность системы достигается при номинальной нагрузке на одном из генераторов и недогрузке остальных.

Активная нагрузка переводится на какой-либо генератор путем воздействия на его привод, а изменение возбуждения генератора приводит лишь к изменению величины и фазы тока.

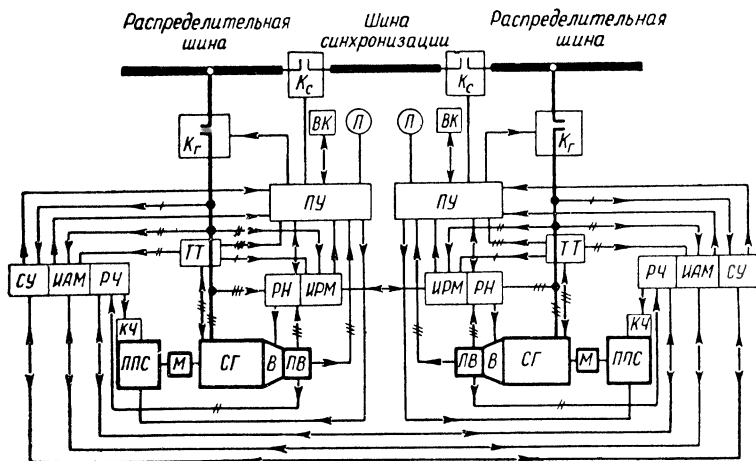


Рис. 4. 1. Блок-схема параллельной работы синхронных генераторов:

СГ—генератор; ПВ—подвозбудитель; В—возбудитель; ППС—привод постоянной скорости; М—муфта свободного хода; РН—регулятор напряжения; ИРМ—измеритель реактивной мощности; РЧ—регулятор частоты; ИАМ—измеритель активной мощности; СУ—синхронизирующее устройство; ТТ—трансформатор тока; ПУ—панель управления; ВК—выключатель; П—приборы; К_г и К_с—контакты; КЧ—корректор частоты

Устройства регулирования и распределения. На рис. 4. 1 представлена блок-схема параллельной работы трехфазных синхронных генераторов, получающих вращение от приводов постоянной скорости. Каждый генератор имеет регулятор частоты РЧ и регулятор напряжения РН.

При автономной работе генераторов регуляторы РЧ и РН поддерживают соответственно частоту и напряжение на заданном уровне. Устойчивость работы системы при этом обеспечивается собственным статизмом регуляторов, т. е. падающей характеристикой скорости в зависимости от активной нагрузки и падающей характеристикой напряжения в зависимости от полной нагрузки.

При параллельной работе генераторов к регулятору частоты добавляется измеритель активной мощности ИАМ, а к регулятору напряжения — измеритель реактивной мощности ИРМ. Эти устройства, реагируя соответственно на скорость вращения и напряжение, стремятся устранить небаланс нагрузки между параллельно ра-

ботающими генераторами и тем самым обеспечить минимальное падение напряжения и частоты (скорости вращения) с ростом нагрузки. Одновременно появляются синхронизирующие устройства СУ, которые обеспечивают включение генераторов на параллельную работу и сохраняют этот режим при заданных параметрах энергосистемы.

§ 2. МОЩНОСТЬ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

При вращении ротора машины, возбужденного потском Φ_0 , в статорной обмотке при холостом ходе индуцируется э. д. с. E_0 .

При смешанной нагрузке индуктивного характера фазные токи I статорной обмотки отстают от э. д. с. E_0 на некоторый угол ψ (рис. 4.2). Эти токи образуют вращающееся поле, которое в свою очередь вызывает изменяющееся потокоцепление обмоток статора (якоря) $\Phi_{\text{я}}$ и э. д. с. реакции якоря $E_{\text{я}}$.

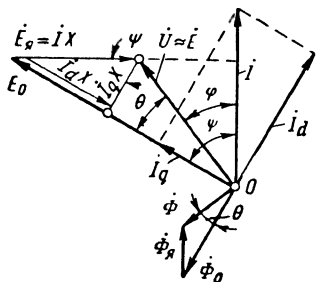


Рис. 4.2. Упрощенная векторная диаграмма синхронного генератора

Сумма векторов Φ_0 и $\Phi_{\text{я}}$ равна потокоцеплению Φ результирующего поля, получающегося вследствие наложения полей ротора и статора. При изменении потокоцепления Φ в обмотке статора наводится результирующая э. д. с. $\dot{E}$, которую можно рассматривать как сумму E_0 и $E_{\text{я}}$. Напряжение $\dot{U}$ на зажимах машины отличается от результирующей э. д. с. $\dot{E}$ на величину падения напряжения в сопротивлении рассеяния и активном сопротивлении обмотки статора. Ввиду малой величины этих сопротивлений

при качественном анализе работы машины ими можно пренебречь и считать э. д. с. $\dot{E}$ равной напряжению $\dot{U}$ на зажимах машины.

Таким образом, э. д. с. E_0 создается основным потоком Φ_0 тогда как напряжение U — результирующим потоком Φ . Каждая э. д. с. отстает от создающего ее потока на 90° , поэтому взаимное расположение потоков определяет и взаимное расположение э. д. с.

Ось основного потока ротора Φ_0 всегда опережает ось результирующего потока Φ статора на угол θ и соответственно вектор э. д. с. E_0 опережает вектор напряжения $\dot{U}$. При этом линии магнитного потока в зазоре идут наклонно, создавая этим определенную силу магнитного тяжения. Если генератор работает вхолостую, то оси полюсов ротора и статора совпадают, т. е. угол $\theta = 0$, а магнитные линии в зазоре идут нормально к поверхности полюсов.

Привод постоянной скорости (ППС), вращающий синхронный генератор, подводит к нему мощность P . Часть этой мощности идет на покрытие потерь: механических, в стали и на возбуждение, если

возбудитель расположен на одном валу с генератором. Оставшаяся часть мощности P_3 , называемая электромагнитной, передается с ротора на статор электромагнитным путем в результате взаимодействия между основным потоком и токами в статоре.

В каждой фазе статорной обмотки индуцируется э. д. с. E_0 и протекает ток I , сдвинутые по фазе на угол ψ . Следовательно, развиваемая генератором электромагнитная мощность, определится уравнением

$$P_3 = mE_0I \cos \psi,$$

где m — число фаз машины.

Из векторной диаграммы находим, что

$$\cos \psi = \frac{U \sin \theta}{IX}.$$

Тогда

$$P_3 = m \frac{E_0 U}{X} \sin \theta,$$

где θ — угол сдвига фаз между вектором э. д. с. холостого хода $\dot{E}_0$ и отстающим от него во времени вектором напряжения $\dot{U}$;
 X — синхронное сопротивление машины, состоящее из индуктивного сопротивления реакции якоря $X_{я}$ и сопротивления X_1 рассеяния.

При неизменном токе возбуждения э. д. с. холостого хода $E_0 = \text{const}$. Если приближенно принять $X = \text{const}$, то при $U = \text{const}$ электромагнитная мощность будет зависеть только от угла θ , т. е. изменяться пропорционально $\sin \theta$.

Активная мощность $P_a = mUI \cos \varphi$, отдаваемая генератором в сеть, меньше электромагнитной на величину потерь мощности mI^2r в обмотке статора. Приближенно можно считать $P_3 \approx P_a$.

Электромагнитный момент. При нагрузке генератора на его ротор действует тормозной электромагнитный момент M_3 , величина которого определяется электромагнитной мощностью генератора P_3 и механической угловой скоростью вращения ротора ω :

$$M_3 = \frac{P_3}{\omega}.$$

Угловая характеристика синхронной машины представляет собой периодическую кривую с положительными и отрицательными участками. Участки с положительными P_3 ($0 < \theta < \pi$; $2\pi < \theta < 3\pi$ и т. д.) соответствуют генераторному режиму (на рис. 4.3 показан первый участок), а участки с отрицательными P_3 ($-\pi < \theta < 0$; $\pi < \theta < 2\pi$ и т. д.) соответствуют двигательному режиму. При вращении ротора с несинхронной скоростью угол θ изменяется непрерывно и машина переходит поочередно из генераторного режима в двигательный и обратно.

Мощность, развиваемая приводом постоянной скорости в заданном режиме, не зависит от угла θ и изображена прямой линией P_{π} . За вычетом механических потерь и потерь в стали мощность изобразится прямой P'_{π} .

При установившемся режиме, пренебрегая потерями в цепи статора, электрическая мощность генератора P_3 , отдаваемая в сеть, будет равна P'_{π} .

Пересечение прямой P'_{π} и кривой P_3 определяет два возможных режима работы генератора, соответствующих точкам 1 и 2.

Если при изменении режима работы генератора ротор получит приращение угла $\Delta\theta$, то для режима в точке 1 соответственно увеличится на ΔP мощность генератора.

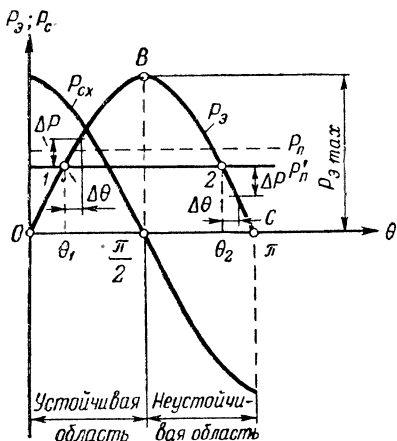
Генератор будет отдавать в сеть большую мощность, чем получает от ППС, поэтому ротор будет затормаживаться и генератор вернется к исходному режиму в точке 1. Наоборот в точке 2 положительному приращению $\Delta\theta$ соответствует отрицательное приращение мощности $-\Delta P$, угол θ будет возрастать еще больше, и генератор выпадает из синхронизма.

Если постепенно увеличивать момент ППС, то соответственно увеличивается подводимая к генератору механическая мощность P_{π} . Ротор начнет смещаться относительно статора вперед по направлению вращения, увеличивая угол θ , при этом магнитные линии в зазоре сильнее растягиваются, оказывая

Рис. 4.3. Угловая характеристика электромагнитной мощности и коэффициента синхронизирующей мощности синхронного генератора

все большее противодействие моменту ППС. Увеличение угла θ и противодействующего момента генератора будет продолжаться до тех пор, пока последний не станет равным по величине моменту ППС. После этого дальнейшее увеличение угла θ прекратится, и генератор будет продолжать работать с прежней синхронной скоростью, но с новым (большим) углом θ , а его электромагнитная мощность возрастет пропорционально $\sin \theta$, достигая максимального значения при $\theta = 90^\circ$.

Если после этого продолжить увеличение момента ППС и соответственно угла θ , то генератор не только не разовьет большей мощности, но, наоборот, начнет уменьшать развиваемую им мощность P_3 и момент M_3 . Избыток вращающего момента ППС относительно M_3 пойдет на придание ускорения ротору, вследствие чего произойдет дальнейшее увеличение угла θ и уменьшение момента M_3 .



В этой области упругие магнитные линии, ранее (при $\theta < 90^\circ$) сцеплявшие ротор и статор, обрываются, вследствие чего ротор начинает вращаться несинхронно с потоком статора. Генератор выпадает из синхронизма, т. е. перестает работать параллельно с сетью.

Из угловой характеристики синхронной машины следует, что участок $ОВ$, соответствующий изменению угла θ от 0 до 90° , представляет собой область устойчивой работы генератора, а участок $ВС$, соответствующий изменению угла θ от 90 до 180° , — область неустойчивой работы генератора.

С увеличением угла θ от 0 до 90° скорость роста электромагнитной мощности снижается и в пределах $75\text{—}90^\circ$ едва заметна.

Синхронизирующая мощность. Электромагнитная мощность $P_{\text{э}}$, приходящаяся на единицу угла θ , называется коэффициентом синхронизирующей мощности:

$$P_{\text{сх}} = \frac{dP_{\text{э}}}{d\theta} = m \frac{E_0 U}{X} \cos \theta.$$

Величина $\Delta P = P_{\text{сх}} \cdot \Delta \theta$ называется синхронизирующей мощностью.

Отклонение угла θ на величину $\Delta \theta$ от установившегося режима вызывает небаланс мощности ΔP , обуславливающий возврат машины к исходному режиму. Величина ΔP пропорциональна крутизне подъема кривой $P_{\text{э}}$. Чем больше $P_{\text{сх}}$, тем больше силы, стремящиеся вернуть ротор генератора в исходный установившийся режим работы.

Если угол $\theta = 0$, электромагнитная мощность, развиваемая генератором, $P_{\text{э}} = 0$, а коэффициент синхронизирующей мощности достигает максимума

$$P_{\text{сх}} = m \frac{F_0 U}{X}.$$

При $\theta = 90^\circ$ генератор развивает максимальную электромагнитную мощность $P_{\text{э max}} = m \frac{E_0 U}{X}$, а коэффициент синхронизирующей мощности $P_{\text{сх}} = 0$, и, следовательно, синхронизирующая мощность $\Delta P = 0$, т. е. генератор не может работать параллельно с другими генераторами.

Практически уже задолго до $\theta = 90^\circ$ генератор начинает работать не вполне устойчиво, поэтому в синхронных генераторах угол θ не превышает 25° , когда $\sin \theta = 0,42$, а $\cos \theta = 0,9$, т. е. при номинальном режиме

$$P_{\text{э}} \leq 0,42 P_{\text{э max}}, \quad P_{\text{сх}} \geq 0,9 P_{\text{э max}}.$$

Перегрузочная способность. Отношение наибольшей электромагнитной мощности, развиваемой генератором при номинальном напряжении и возбуждении, к электромагнитной мощ-

ности, развиваемой при номинальном режиме, называется перегрузочной способностью генератора:

$$K_n = \frac{P_{э \max}}{P_{э \text{ ном}}} = \frac{1}{\sin \theta} \approx \frac{P_{\max}}{P_{\text{ном}}}.$$

Перегрузочная способность генератора тем больше, чем меньше угол θ .

Если номинальная мощность генератора $P_{\text{ном}}$ и напряжение сети U заданы, то уменьшить θ возможно двумя путями: увеличением э. д. с. E_0 за счет увеличения тока возбуждения или уменьшением X . Оба способа приводят к увеличению объема обмотки возбуждения и, следовательно, к увеличению размеров и веса машины.

Перегрузочная способность характеризует статическую устойчивость генератора, т. е. ту предельную мощность, которую он может развить при медленном возрастании нагрузки и при $U = \text{const}$.

Статическая устойчивость генератора, работающего с заданной нагрузкой, повышается при увеличении его максимального электромагнитного момента, т. е. при увеличении E_0 путем увеличения тока возбуждения.

Динамическая устойчивость генератора при коротких замыканиях или резком изменении нагрузки, когда возможно размагничивающее действие реакции якоря, повышается форсированием возбуждения или компаундированием.

§ 3. РАБОТА ГЕНЕРАТОРА ВХОЛОСТУЮ

При выполнении всех условий синхронизации генератор после включения его на параллельную работу будет находиться в режиме холостого хода ($\theta = 0$).

В зависимости от величины возбуждения возможны три характерных режима работы генератора:

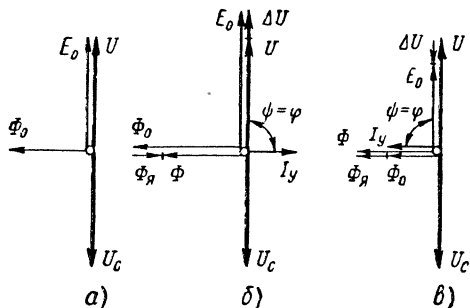


Рис. 4.4. Векторная диаграмма синхронного генератора, работающего вхолостую:

а—нормальное возбуждение; б—первозбуждение; в—недо возбуждение

генератором в сеть, равен нулю, а э. д. с. E_0 в то же время является его напряжением, т. е. ее вектор совпадает с вектором напряжения U по величине и фазе ($\theta = 0$) и, следовательно, генератор не отдает в сеть ни активной, ни реактивной мощности.

2. При перевозбуждении увеличиваются магнитный поток полюсов и наведенная в якоре генератора э. д. с. E_0 . Одновременно в якоре генератора появляется ток и магнитный поток реакции якоря. Таким образом, рабочий магнитный поток Φ в воздушном зазоре машины будет определяться разностью потоков полюсов Φ_0 и реакции якоря $\Phi_{\text{я}}$ (см. рис. 4.4, б).

Теперь э. д. с. E_0 состоит из двух составляющих: U , уравнивающей напряжение сети U_c и ΔU , уравнивающей э. д. с., наводимую в якоре потоком $\Phi_{\text{я}}$ и представляющей собой полное падение напряжения в якоре:

$$E_0 = U + \Delta U; \Delta U = E_0 - U.$$

Разность потенциалов ΔU вызывает появление уравнивающего тока I_y в цепи генератора и сети, который отстает на 90° от ΔU и U , так как $X \gg r$:

$$I_y = \frac{\Delta U}{Z} \approx \frac{\Delta U}{X},$$

где Z , X и r — соответственно полное, индуктивное и активное сопротивления якоря.

Этот ток является чисто индуктивным относительно генератора и чисто емкостным относительно напряжения сети. Создавая продольную реакцию якоря, он стремится размагнитить данный генератор, снизить его э. д. с. и намагнитить генераторы, работающие параллельно с ним (увеличить их э. д. с.).

Таким образом, при перевозбуждении и $\theta = 0$ генератор отдает в сеть только реактивную мощность индуктивного характера.

3. При недовозбуждении генератора рабочий магнитный поток будет определяться суммой потоков полюсов и реакции якоря (см. рис. 4.4, в).

В цепи генератора и сети возникает уравнивающий ток, величина которого находится аналогично режиму перевозбуждения. Этот ток отстает на 90° от ΔU и опережает на 90° U .

Таким образом, при недовозбуждении и $\theta = 0$, генератор потребляет из сети реактивную мощность индуктивного характера.

§ 4. РАБОТА ГЕНЕРАТОРА ПАРАЛЛЕЛЬНО С СЕТЬЮ ПРИ ПОСТОЯННОМ ВОЗБУЖДЕНИИ И ПЕРЕМЕННОЙ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

$$(i_{\text{н}} = \text{const}; P = \text{var})$$

Рассмотрим параллельную работу генератора с сетью бесконечной мощности, где напряжение и частота постоянны ($U_c = \text{const}$, $f = \text{const}$) и не зависят от изменения возбуждения или нагрузки генератора.

Для того чтобы нагрузить генератор, включенный на параллельную работу с сетью, необходимо воздействовать на его привод постоянной скорости (ППС), который, в свою очередь, изменяет вращающий момент и электромагнитную (активную) мощность генератора. В этом случае э. д. с. опережает напряжение и генера-

тор берет на себя активную мощность, пропорциональную синусу угла θ .

При постоянном возбуждении генератора его э.д.с. постоянна и, следовательно, активная мощность зависит только от изменения синуса угла θ .

На векторной диаграмме рис. 4.5 показан случай перехода генератора от режима холостого хода, когда его э.д.с. E_0 уравновешена напряжением сети U_c , к некоторой нагрузке I , при которой вектор E_0 опережает напряжение U на угол θ .

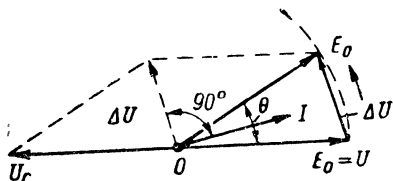


Рис. 4.5. Векторная диаграмма перехода синхронного генератора от режима холостого хода к нагрузке

В результате опережения возникает некоторая разность потенциалов ΔU , вызывающая в цепи генератор—сеть появления тока I , отстающего по фазе от напряжения ΔU на 90° . Так как у генератора $X \gg r$, то величина тока определяется формулой

$$I = \frac{E - U}{X} = \frac{\Delta U}{X}.$$

Этот ток по фазе почти совпадает с э.д.с. генератора, а по отношению напряжения сети находится почти в противофазе, т. е. является активным током нагрузки для генератора и активным током разгрузки для сети.

Если изменить режим ППС так, чтобы ротор его генератора получил ускорение относительно роторов других генераторов на некоторый угол, то э.д.с. рассматриваемого генератора опередит э.д.с. других генераторов, что вызовет соответствующее увеличение активной мощности данного генератора. Таким образом, опережение по фазе вектора э.д.с. данного генератора векторов э.д.с. других генераторов влечет за собой увеличение его нагрузки, а отставание — уменьшение.

Для того чтобы генератор отдавал в сеть только активную мощность, необходимо иметь определенное нормальное его возбуждение, которое возрастает с увеличением нагрузки.

Для отдачи в сеть активной и индуктивной мощности генератор должен иметь определенное перевозбуждение, а для отдачи в сеть активной и емкостной мощности определенное недовозбуждение. Величина необходимого перевозбуждения или недовозбуждения определяется величиной и характером нагрузки.

§ 5. РАБОТА ГЕНЕРАТОРА ПАРАЛЛЕЛЬНО С СЕТЬЮ ПРИ ПЕРЕМЕННОМ ВОЗБУЖДЕНИИ И ПОСТОЯННОЙ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

($i_b = \text{var}$; $P = \text{const}$)

На рис. 4.6 показаны векторные диаграммы синхронного генератора, работающего параллельно с сетью бесконечной мощности при переменном возбуждении и постоянной активной мощности.

Проследим на векторных диаграммах изменения режима работы генератора при регулировании тока возбуждения.

При неизменном вращающем моменте ППС активная и электромагнитная мощности генератора постоянны.

Так как напряжение на зажимах генератора остается также неизменным $U = \text{const}$, то

$$I_a = I \cos \varphi = \text{const},$$

$$E_0 \sin \theta = \text{const}.$$

Полученные равенства показывают, что векторы $\dot{I}$ и $\dot{E}_0$ имеют годографы (геометрические места концов векторов) в виде прямых

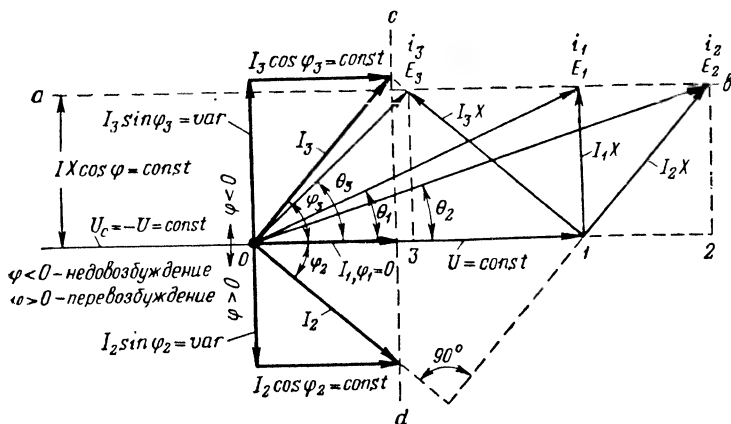


Рис. 4.6. Векторные диаграммы синхронного генератора, работающего параллельно с сетью бесконечной мощности при изменении возбуждения

cd и ab , изображенных пунктиром, где три векторные диаграммы соответствуют различным величинам э. д. с. (т. е. токам возбуждения).

При нормальном возбуждении i_1 генератор имеет: э. д. с. E_1 , $\varphi_1 = 0$, минимально возможный ток статора I_1 и отдает в сеть только активную мощность P .

Если перевозбудить генератор, дав ему возбуждение i_2 , то соответственно изменятся величины и направление э. д. с. E_2 и тока I_2 ; последний образует с напряжением U угол $\varphi_2 > 0$. Генератор отдает в сеть ту же величину активной мощности и реактивную мощность индуктивного характера.

Аналогичное явление происходит при недовозбуждении генератора, когда ток возбуждения i_3 , э. д. с. E_3 , ток I_3 и угол $\varphi_3 < 0$.

Генератор отдает в сеть активную мощность той же величины и реактивную мощность емкостного характера.

Таким образом изменение возбуждения вызывает изменение тока генератора как по величине, так и по фазе за счет реактивной составляющей, а активная составляющая остается постоянной.

На рис. 4.7 показаны U-образные кривые синхронного генератора, характеризующие работу машины при постоянной мощности ($P = \text{const}$) и переменном возбуждении ($i_b = \text{var}$).

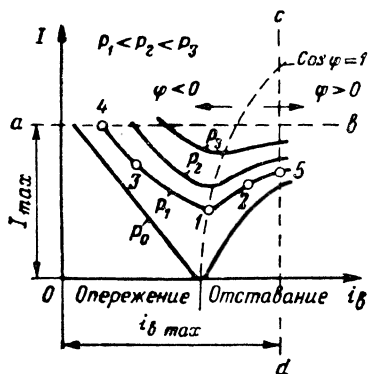


Рис. 4.7. U-образные кривые синхронного генератора

Семейство кривых дано для различных мощностей $P_3 > P_2 > P_1 > P_0 = 0$, где кривая $P_0 = 0$ снята для холостого хода. Минимальные токи генератора при $\cos \varphi = 1$. По мере увеличения мощности вершины кривых перемещаются вверх и вправо, так как при увеличении нагрузки для получения постоянного напряжения, возбуждение должно быть увеличено.

Величина синхронного сопротивления машины X оказывает влияние на характер U-образных кривых, т. е. чем меньше X , тем острее кривые.

Работа генератора определяется пограничными прямыми ab и cd , устанавливающими максимально допустимые токи статора и возбуждения. Например, при мощности P_1 генератор может работать без перегрева от точки 4 до точки 5, при этом $\cos \varphi$ будет различным. Левее точки 4 будет перегрев обмотки статора (якоря), а правее точки 5 — перегрев обмотки ротора (возбуждения).

При регулировании тока возбуждения i_b изменяется и угол θ . Чем больше ток i_b , тем меньше угол θ , и наоборот.

§ 6. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ГЕНЕРАТОРОВ СРАВНИМОЙ МОЩНОСТИ

Параллельная работа двух генераторов сравнимой мощности, вращающихся с постоянными угловыми скоростями, происходит в основном аналогично параллельной работе генератора с сетью бесконечной мощности. Однако при изменении углов θ вектор напряжения U не остается постоянным, как это было при работе генератора с сетью бесконечной мощности.

Перевод нагрузки с одного генератора на другой качественно представлен на рис. 4.8. Развиваемая первым генератором электромагнитная мощность определяется углом θ_1 , а второго — θ_2 . Если второму генератору сообщить некоторое опережение $\Delta\theta_2$, то его э. д. с. E_2 переместится в положение E'_2 , вектор напряжения U в положение U' и вектор тока I в положение I' .

После этого мощности, отдаваемые генераторами, определяются углами θ'_1 и θ'_2 . Мощность первого генератора уменьшается, а второго возрастает.

При увеличении нагрузки в сети на диаграмме рис. 4.9 векторы тока I и напряжения U соответственно переместятся в положение I' и U' . Активные мощности, отдаваемые генераторами в сеть, будут определяться углами θ'_1 и θ'_2 . Вектор тока I' при этом возрастает, а вектор напряжения U' — уменьшается. Для того чтобы напряжение сети осталось неизменным, необходимо соответственно увеличить возбуждение обоих генераторов.

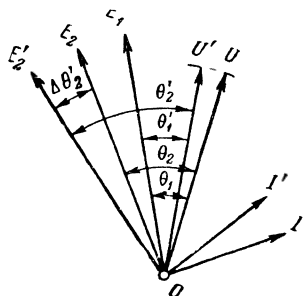


Рис. 4.8. Векторная диаграмма перевода нагрузки с одного генератора на другой

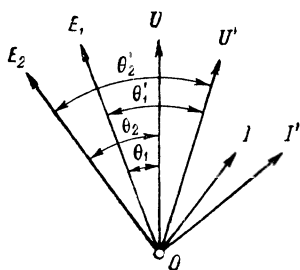


Рис. 4.9. Векторная диаграмма увеличения нагрузки генератора

При параллельной работе нескольких одинаковых генераторов общая мощность их приблизительно пропорциональна сумме синусов углов θ и распределяется между ними пропорционально синусам этих углов.

Для перевода нагрузки с одной группы генераторов на другую необходимо воздействовать на регуляторы их приводов, обеспечивающих необходимое изменение углов θ так, чтобы сумма увеличений углов одной группы равнялась сумме уменьшений углов другой.

Реактивная мощность между одинаковыми параллельно работающими генераторами при одинаковом возбуждении распределяется поровну, что обеспечивает наименьшие потери в меди якорей.

Перевод реактивной нагрузки с одной группы генераторов на другую при сохранении неизменного напряжения на шинах достигается изменением возбуждения машины (уменьшением разгружаемых и увеличением нагружаемых).

Если необходимо отключить один генератор от сети, то сначала следует перевести с него на остальные генераторы активную нагрузку, а затем и реактивный ток. После этого отключение генератора не вызовет толчка тока в оставшихся генераторах и колебания напряжения на шинах сети.

§ 7. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЕ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Напряжение на распределительных шинах поддерживается постоянным (в допустимых пределах) регуляторами напряжения, путем изменения возбуждения генераторов.

Так как практически существует разница характеристик, настройки и скорости действия регуляторов напряжения, то возможно перевозбуждение одних генераторов и недовозбуждение других. В результате этого реактивная нагрузка распределяется между генераторами неустойчиво и неравномерно. Это может привести к недопустимой перегрузке перевозбужденных генераторов реактивным током.

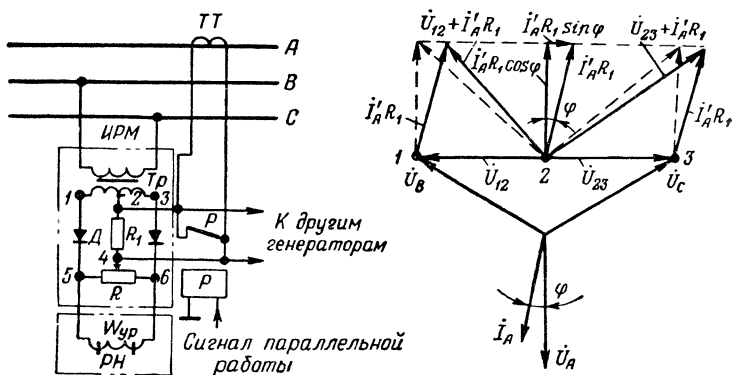


Рис. 4.10. Схема и векторная диаграмма измерителя реактивной мощности

Измерители реактивной мощности (ИРМ), реагируя на неравномерное распределение реактивной нагрузки, воздействуют на цепи возбуждения генераторов через регуляторы напряжения и помогают избежать указанных выше явлений.

Измеритель реактивной мощности (ИРМ). Одна из возможных схем и векторная диаграмма измерителя реактивной мощности показаны на рис. 4.10.

В схеме используется принцип выделения сигнала, пропорционального реактивному току генератора. Этот сигнал подается в уравнительную обмотку $W_{ур}$ магнитного усилителя регулятора напряжения. Питается устройство от входного трансформатора Тр, включенного на линейное напряжение генератора. Трансформатор тока ТТ включен в «свободную» фазу, а его нагрузкой является сопротивление R_1 , включенное между средними точками вторичной обмотки входного трансформатора и выходного сопротивления R .

В схеме используется однополупериодное выпрямление, при котором выходное напряжение равно разности напряжений на плечах сопротивления R , а токи направлены навстречу друг другу.

При раздельной работе генераторов, когда вторичная обмотка трансформатора тока ТТ шунтируется контактами реле Р, или при параллельной работе и равномерной нагрузке генераторов ток от трансформатора не протекает через сопротивление R_1 и разность потенциалов между точками 5 и 6 равна нулю.

При неравномерной нагрузке генераторов на сопротивлении R_1 за счет тока фазы А (I'_A — ток с учетом коэффициента трансформации) возникает падение напряжения, которое суммируется с напряжениями $\dot{U}_{12}$ и $\dot{U}_{23}$ и дает векторы $\dot{I}'_A R_1 + \dot{U}_{12}$ и $\dot{I}'_A R_1 + \dot{U}_{23}$.

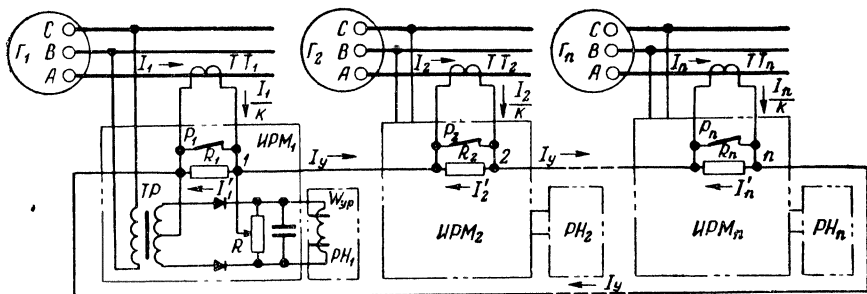


Рис. 4.11. Принципиальная схема включения измерителей реактивной мощности при параллельной работе генераторов

Если вектор $\dot{I}'_A R_1$ разложить на активную $\dot{I}'_A R_1 \cos \varphi$ и реактивную $\dot{I}'_A R_1 \sin \varphi$ составляющие, то активная составляющая при суммировании с векторами $\dot{U}_{12}$ и $\dot{U}_{23}$ даст два одинаковых вектора (пунктиры на диаграмме) и разность потенциалов точек 5 и 6 от этих векторов будет равна нулю. Реактивная составляющая вычитается из вектора $\dot{U}_{12}$ и складывается с вектором $\dot{U}_{23}$, поэтому между точками 5 и 6 появится разность потенциалов $2KI'_A R_1 \sin \varphi$ (где K — коэффициент выпрямления), пропорциональная реактивной составляющей тока.

Разница в потенциалах вызывает ток в уравнивающей обмотке регулятора напряжения. При отстающем $\cos \varphi$ генератора ампер-витки уравнивающей обмотки направлены согласно с ампер-витками обмотки управления регулятора напряжения. При этом напряжение генератора снижается пропорционально величине индуктивного тока разбаланса между генераторами.

При опережающем $\cos \varphi$ (емкостная нагрузка) уравнивательный ток меняет свое направление, и напряжение генератора возрастает.

Распределение реактивной мощности. На рис. 4.11 представлена принципиальная схема соединений измерителей реактивной мощности (ИРМ) при параллельной работе n генераторов, где вторичные обмотки трансформаторов тока соединены последовательно.

Если все параллельно работающие генераторы загружены равномерно, то по вторичным обмоткам трансформаторов тока протекают одинаковые токи, пропорциональные полным токам генераторов. Эти токи замыкаются через уравнительную цепь; падение напряжения на сопротивлениях связи от реактивных составляющих тока нагрузки не возникает и, следовательно, нагрузки не влияют на регуляторы напряжения.

Если по какой-либо причине реактивная нагрузка одного из генераторов становится больше остальных, то в сопротивлениях связи начнут протекать соответствующие токи $I'_1; I'_2; \dots I'_n$.

Для контура, состоящего из сопротивлений связи $R_1; R_2; \dots R_n$ (пренебрегая сопротивлением соединительных проводов), по второму закону Кирхгофа можно написать уравнение

$$I'_1 R_1 + I'_2 R_2 + \dots + I'_n R_n = 0. \quad (1)$$

Так как $R_1 = R_2 = \dots = R_n = R$, то

$$I'_1 + I'_2 + \dots + I'_n = 0.$$

По первому закону Кирхгофа для узлов 1, 2, ... n справедливы следующие выражения:

$$I'_1 = \frac{I_1}{K} - I_y; \quad I'_2 = \frac{I_2}{K} - I_y; \quad \dots \quad I'_n = \frac{I_n}{K} - I_y, \quad (2)$$

где I_i — ток нагрузки i -го генератора;

K — коэффициент трансформации трансформатора тока;

I_y — уравнительный ток в соединительном проводе.

Подставим эти выражения в формулу (1)

$$\frac{I_1}{K} - I_y + \frac{I_2}{K} - I_y + \dots + \frac{I_n}{K} - I_y = 0;$$

$$K I_y = \frac{I_1 + I_2 + \dots + I_n}{n} = I_{\text{ср}};$$

$$I_y = \frac{I_{\text{ср}}}{K};$$

$$I'_1 = \frac{I_1}{K} - \frac{I_{\text{ср}}}{K} = \frac{I_1 - I_{\text{ср}}}{K}; \quad I'_2 = \frac{I_2 - I_{\text{ср}}}{K}; \quad \dots$$

$$\dots \quad I'_n = \frac{I_n - I_{\text{ср}}}{K};$$

$$I'_i = \frac{I_i - I_{\text{ср}}}{K}.$$

Таким образом, ток, протекающий через уравнительное сопротивление i -й цепи, пропорционален отклонению тока нагрузки i -го генератора от среднего значения токов нагрузки всех генераторов. Как отмечалось выше, ИРМ снимает с сопротивления связи сигнал, пропорциональный реактивной нагрузке, и подает его на i -й регу-

лятор напряжения. Последний вызывает уменьшение тока возбуждения данного генератора и соответствующее снижение его реактивной нагрузки.

Суммарное падение напряжения на всех сопротивлениях остальных генераторов равно падению напряжения на сопротивлении i -го генератора, но имеет противоположный знак и делится между этими сопротивлениями пропорционально их величинам. Эти падения напряжения вызывают соответствующее увеличение тока возбуждения и соответственно реактивной нагрузки остальных генераторов.

Так достигается равномерное распределение реактивной нагрузки между генераторами, причем напряжение на шинах остается неизменным.

Если по условию эксплуатации или вследствие неисправности какой-либо генератор отключается от общих шин, то его трансформатор тока автоматически шунтируется блок-контактами соответствующего реле, исключая тем самым его влияние на распределение реактивной нагрузки между параллельно работающими генераторами.

Неисправности при параллельной работе генераторов могут вызвать следующие явления.

1. Недовозбуждение одного из генераторов вследствие неисправности или неправильной первоначальной установки РН приводит к соответствующей разгрузке этого генератора от реактивной мощности. Уравнительная цепь, стремясь выравнить реактивную нагрузку, уменьшает напряжение на исправных генераторах. В результате в сети установится пониженное напряжение. При значительной нагрузке в сети большое снижение синхронизирующего момента неисправного генератора может привести к выпадению его из синхронизма.

2. Перевозбуждение одного из генераторов вследствие неисправности или неправильной первоначальной установки РН приводит к соответствующей перегрузке этого генератора реактивным током. Уравнительная цепь, стремясь выравнить реактивную нагрузку, приводит к росту напряжения на исправных генераторах. Напряжение на неисправном генераторе не снижается из-за неисправности его возбуждения. В результате в сети может установиться значительное перенапряжение, при этом неисправный генератор перевозбужден, а исправные — недовозбуждены. При значительной нагрузке в сети снижение возбуждения исправных генераторов может привести к выпадению их из синхронизма вследствие снижения синхронизирующих моментов.

§ 8. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЕ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

При параллельной работе синхронных генераторов активная мощность равномерно распределяется автоматической системой, состоящей из измерителей активной мощности, корректирующих

устройств и регуляторов скорости, воздействующих на приводы постоянной скорости (ППС), которые соответственно изменяют вращающие моменты генераторов.

Измеритель активной мощности (ИАМ). Одна из возможных схем измерителя активной мощности и его векторная диаграмма при равномерной нагрузке фаз представлены на рис. 4.12 и 4.13. Схема позволяет получить напряжение, пропорциональное активной составляющей тока генератора. Как видно из схемы, напряжение фазы A делится пополам в точке 3 и каждая

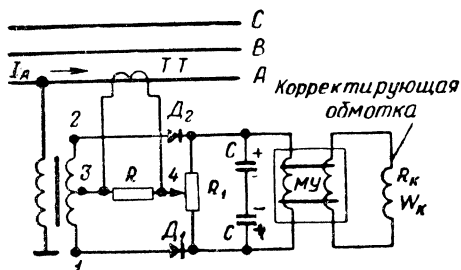


Рис. 4.12. Измеритель активной мощности

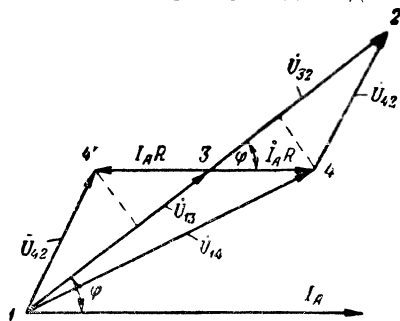


Рис. 4.13. Векторная диаграмма измерителя активной мощности

половина U_{13} и U_{32} соответственно выпрямляются диодами D_1 и D_2 и взаимно вычитаются на сопротивлении R_1 . Следовательно, результирующее напряжение, снимаемое с этого сопротивления, пропорционально разности векторов напряжений U_{14} и U_{42} :

$$\dot{U}_a = K(\dot{U}_{14} - \dot{U}_{42}),$$

где K — коэффициент пропорциональности.

Так как напряжения U_{14} и U_{42} при холостом ходе равны и противоположно направлены, то результирующее напряжение $U_a = 0$.

Если на сопротивление R подать напряжение, пропорциональное току нагрузки I_a от трансформатора тока ТТ, то напряжения U_{14} и U_{42} будут равны соответственно сумме и разности векторов напряжений ($U_{14.0}$, $U_{42.0}$) при холостом ходе и падения напряжения в сопротивлении R , т. е.

$$\dot{U}_{14} = \dot{U}_{14.0} + R\dot{I}_A; \quad \dot{U}_{42} = \dot{U}_{42.0} - R\dot{I}_A,$$

где коэффициент трансформации тока условно принят за единицу.

Теперь разность напряжений $U_{14} - U_{42}$ уже не равна нулю, т. е.

$$\dot{U}_a = K(\dot{U}_{14} - \dot{U}_{42}) = K(\dot{U}_{14.0} + R\dot{I}_A - \dot{U}_{42.0} + R\dot{I}_A) = 2KR\dot{I}_A.$$

При малой величине RI_A разность векторов напряжений U_{14} и U_{42} можно заменить разностью их проекций на направление напряжения U_{12} , т. е.

$$U_a = 2KRI_A \cos \varphi.$$

Таким образом, на сопротивлении R_1 выходное напряжение пропорционально активному току нагрузки. Это напряжение используется для питания корректирующей обмотки регулятора скорости.

Распределение активной мощности. Регулятор скорости привода, получая управляющий сигнал от центробежного

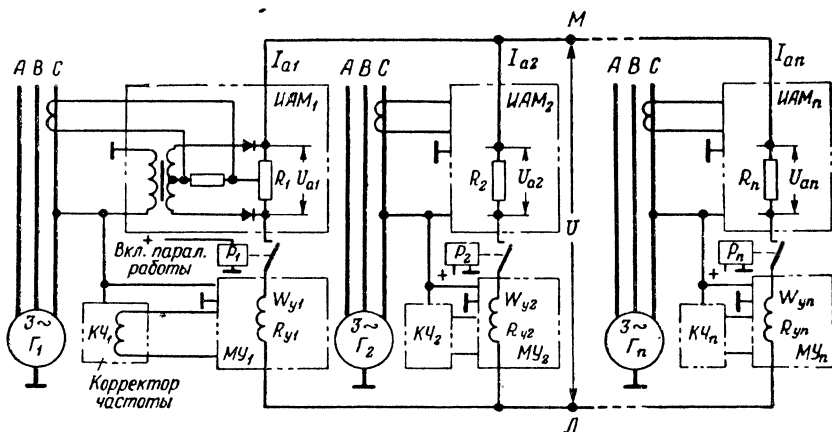


Рис. 4.14. Принципиальная схема включения измерителей активной мощности при параллельной работе синхронных генераторов

датчика (или тахогенератора), связанного с валом генератора, и воздействуя на привод постоянной скорости, обеспечивает постоянство скорости вращения генератора (частоты генерируемого тока) как при раздельной, так и при параллельной работе генераторов.

Измерители активной мощности с помощью корректирующих обмоток, действуя на регуляторы скорости, обеспечивают параллельную работу генераторов, и равномерное распределение активной мощности между ними.

Одна из возможных схем распределения активной мощности между параллельно работающими генераторами приведена на рис. 4.14. В схеме корректирующие цепи всех генераторов соединены параллельно и сопротивления корректирующих обмоток магнитных усилителей равны, т. е.

$$R_{y1} = R_{y2} = \dots = R_{yi} = \dots = R_{yn} = R_y.$$

Обозначим напряжение между точками M и L через U . На основании первого закона Кирхгофа для точки M можно написать

$$\begin{aligned} I_{a1} + I_{a2} + \dots + I_{ai} + \dots + I_{an} &= 0; \\ \frac{U - U_{a1}}{R_y} + \frac{U - U_{a2}}{R_y} + \dots + \frac{U - U_{ai}}{R_y} + \dots & \\ \dots + \frac{U - U_{an}}{R_y} &= 0; \\ U = \frac{U_{a1} + U_{a2} + \dots + U_{ai} + \dots + U_{an}}{n} &= U_{cp}. \end{aligned}$$

Таким образом, напряжение между точками M и L равно среднему арифметическому падений напряжений на выходных сопротивлениях ИАМ.

Если активная нагрузка на всех генераторах одинакова, то активные составляющие токов нагрузки и, следовательно, напряжения на выходе измерителей активной мощности будут одинаковы, т. е.

$$U_{a1} = U_{a2} = \dots = U_{ai} = \dots = U_{an} = U.$$

При этом

$$\begin{aligned} I_{a1} = \frac{U - U_{a1}}{R_y} &= 0; \quad I_{a2} = \frac{U - U_{a2}}{R_y} = 0; \quad \dots \\ \dots \quad I_{an} &= \frac{U - U_{an}}{R_y} = 0, \end{aligned}$$

т. е.

$$I_{a1} = I_{a2} = \dots = I_{ai} = \dots = I_{an} = 0.$$

Таким образом, при равномерном распределении активной нагрузки токи в корректирующих цепях не возникают, следовательно, сигнал не поступает в корректор частоты КЧ и последний не оказывает влияния на регулятор скорости.

Если по каким-либо причинам активные нагрузки одного или нескольких генераторов изменяются, то соответственно изменяются корректирующие напряжения ($U_{a1}, U_{a2} \dots U_{an}$) всех генераторов. В корректирующих обмотках магнитных усилителей возникают токи, пропорциональные отклонениям корректирующих напряжений от средней величины напряжения U_{cp} :

$$I_{a1} = \frac{U_{a1} - U_{cp}}{R_y}; \quad I_{a2} = \frac{U_{a2} - U_{cp}}{R_y}; \quad \dots \quad I_{an} = \frac{U_{an} - U_{cp}}{R_y}.$$

В соответствии с этими токами магнитные усилители через корректоры частоты воздействуют на регуляторы скорости пропорционально отклонению активной нагрузки генераторов от средней активной нагрузки, приходящейся на один генератор.

Так, например, если активная нагрузка в одном из генераторов уменьшится, то в его корректирующей обмотке появится ток $I_{ai} > 0$, который приведет к увеличению вращающего момента на валу этого генератора и соответствующему увеличению его активной мощности. Одновременно в корректирующих обмотках остальных генераторов появятся токи обратного направления (вследствие снижения среднего значения корректирующего напряжения U_{cp} из-за уменьшения напряжения U_{ai}), которые приведут к уменьшению вращающих моментов и активных нагрузок этих генераторов.

§ 9. АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ

Приводы постоянной скорости с регулятором скорости без корректирующего устройства позволяют получить частоту с точностью примерно $\pm 2\%$, а для автоматической синхронизации генераторов при параллельной работе необходима более высокая точность стабилизации частоты $\pm 1\%$ и выше.

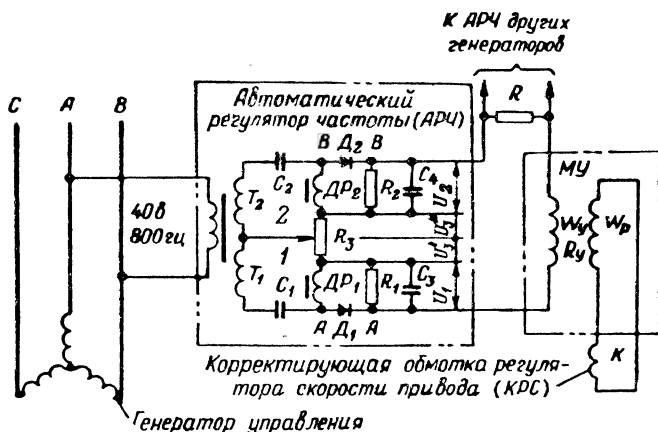


Рис. 4. 15. Принципиальная схема автоматического регулятора частоты

Для получения частоты с такой точностью применяются дифференциальные схемы автоматических регуляторов частоты (АРЧ) с магнитными усилителями, один из вариантов которого представлен на рис. 4. 15.

В схеме имеются два резонансных контура, из которых 1 настроен на частоту, несколько меньшую номинальной, а 2 — на частоту, несколько большую номинальной. Напряжения с выходов этих контуров через выпрямители встречно подаются на управляющую обмотку магнитного усилителя.

При частоте генератора, равной номинальной, в контурах протекают равные токи, сдвинутые относительно друг друга на 180° .

Потенциалы в точках A и B равны и, следовательно, ток на выходе отсутствует.

При уменьшении частоты ток контура 2 уменьшается, а ток контура 1 увеличивается. Следовательно, при уменьшении частоты потенциал точки A будет выше потенциала точки B , и выпрямленный ток от точки A потечет к точке B по обмотке управления W_y магнитного усилителя.

Величина тока пропорциональна разности падений напряжений на сопротивлениях R_1 , R_2 и R_3 :

$$I_y = \frac{(\dot{U}_1 + \dot{U}_3') - (\dot{U}_2 + \dot{U}_3'')}{R_y}.$$

При увеличении частоты выше номинальной потенциал в точке B становится выше потенциала точки A , ток в обмотке управления магнитного усилителя изменяет направление.

График изменения тока в управляющей обмотке в зависимости от изменения частоты показан на рис. 4. 16.

Для повышения устойчивости и точности работы АРЧ и уменьшения габаритов резонансных контуров он питается напряжением повышенной частоты (800 или 1200 гц) от генератора управления, установленного на одном валу с основным синхронным генератором.

Питание от генератора управления позволяет реагировать на скорость вращения ротора, а не на частоту сети, которая в переходных процессах при параллельной работе может не совпадать со скоростью ротора.

Регуляторы частоты, работающие по такой схеме, поддерживают частоту синхронного генератора с точностью до $\pm 1\%$ и выше.

При раздельной и параллельной работе генераторов выходные цепи АРЧ соединяются между собой параллельно, как показано на рис. 4. 17. Схема позволяет свести к минимуму разность в частотах отдельных генераторов. Из схемы очевидно, что на выходе каждого магнитного усилителя в зависимости от отклонения частоты генератора создается напряжение

$$U_i = K f_i,$$

а в линиях, соединяющих точки A и B , поддерживается среднее напряжение U_{cp} . При отклонении частоты любого генератора по обмотке управления W_y его магнитного усилителя потечет ток, пропорциональный мгновенному отклонению частоты:

$$I = \frac{U_i - U_{cp}}{Z} \equiv \frac{f_i - f_{cp}}{Z},$$

где Z — сопротивление рабочей обмотки магнитного усилителя.

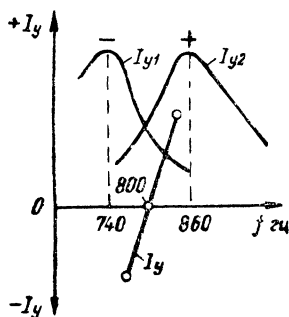


Рис. 4. 16. График изменения тока в управляющей обмотке в зависимости от частоты

В соответствии с током управляющей обмотки магнитный усилитель выдает сигнал в корректирующую обмотку регулятора ско-

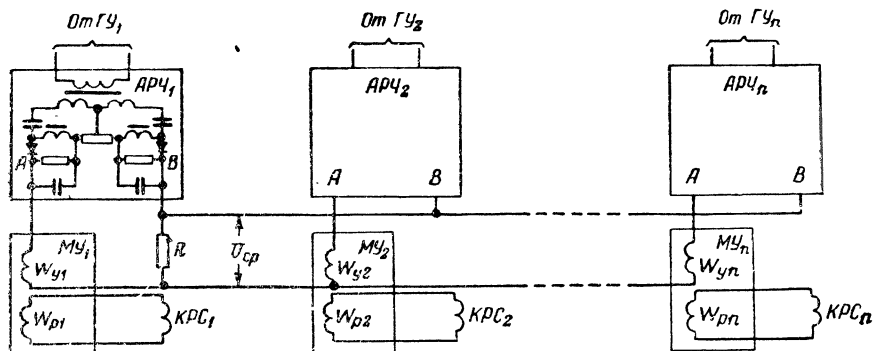


Рис. 4.17. Принципиальная схема включения АРЧ при параллельной работе

рости привода. Последний, изменяя скорость вращения генератора, восстанавливает его номинальную частоту.

§ 10. СИНХРОНИЗАЦИЯ ГЕНЕРАТОРОВ ПРИ ВКЛЮЧЕНИИ НА ПАРАЛЛЕЛЬНУЮ РАБОТУ

Генераторы включаются на параллельную работу при строгой синхронизации (напряжений, частот, совпадении фаз и одинаковой их последовательности). Специальные устройства обеспечивают условия синхронизации в момент включения генератора и сохраняют их после включения при минимальном уравнительном токе и минимальном толчке избыточной мощности в момент включения. Несоблюдение условий синхронизации приводит к возникновению толчков уравнительного тока и избыточного момента.

Включение генераторов при равенстве напряжений и неравенстве частот или несоответствии фаз вызывает пульсацию разности напряжений и возникновение активной составляющей тока, которая попеременно нагружает сеть и подключаемый генератор активной мощностью.

Включение при равенстве частот и совпадении фаз, но несоблюдении равенства напряжений, вызывает уравнительный ток

$$j_{yp} = \frac{\dot{E} - \dot{U}_c}{(R + R_c) + j(X + X_c)}$$

и при

$$R \ll X \text{ и } R_c \ll X_c$$

$$I_{yp} = -j \frac{\dot{E} - \dot{U}_c}{X + X_c},$$

где R и X — сопротивления генераторов;
 R_c и X_c — сопротивления сети,

т. е. уравнивающий ток имеет в основном реактивный характер. Он усиливает поле машины с пониженным напряжением и снижает поле машины с повышенным напряжением, сохраняя на зажимах сети одинаковое напряжение.

Существуют два способа синхронизации: самосинхронизация и точная синхронизация. В авиации получила распространение точ-

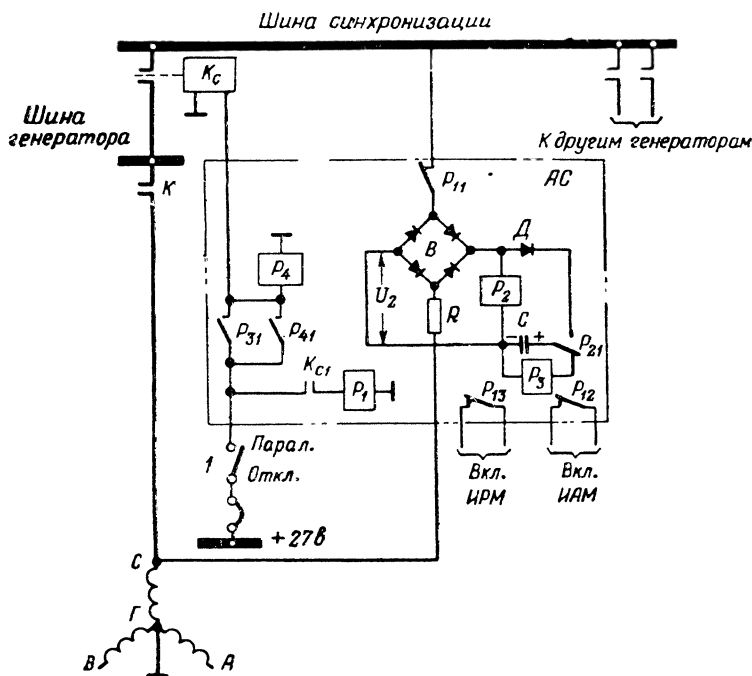


Рис. 4. 18. Принципиальная схема автоматического устройства точной синхронизации

ная автоматическая синхронизация, возможная принципиальная схема которой приведена на рис. 4. 18.

В рассматриваемой схеме генератор имеет частоту, близкую к частоте сети, и контактором K подключен к собственной распределительной шине. На параллельную работу (к шине синхронизации) генератор включается автоматически синхронизатором при включенном выключателе параллельной работы 1.

К диагонали выпрямителя B подводится напряжение, равное разности напряжений одноименных фаз включаемого генератора и шины синхронизации. Это напряжение биений, пропорциональное скольжению генератора, выпрямляется и подается в обмотку реле P_2 . Если выпрямленное напряжение U_2 выше напряжения срабатывания реле P_2 , то реле срабатывает, контакты P_{21} замкнутся и конденсатор C начнет заряжаться.

При синхронизации напряжение U_2 снизится до величины отпущения реле P_2 , контакты P_{21} замкнут цепь реле P_3 и конденсатор C разрядится через обмотку реле P_3 . При срабатывании реле P_3 контакты P_{31} замыкаются. Контакт K_c срабатывает и подключает генератор на параллельную работу (к шине синхронизации). Контакты K_c замыкают цепь реле P_1 . Контакты P_{11} размыкаются, отключая АС от шины синхронизации, контакты P_{12} замыкаются, а P_{13} размыкаются, включая соответственно ИАМ и ИРМ на параллельную работу.

Таким образом, генератор включается на шину синхронизации (на параллельную работу) после отпущения реле P_2 через время, равное суммарному времени срабатывания реле P_3 и контактора синхронизации K_c .

§ 11. ПОВЕДЕНИЕ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ ПРИ НЕИСПРАВНОСТИ ПРИВОДА И РОЛЬ МУФТЫ СВОБОДНОГО ХОДА

Выходной вал ППС и вал генератора могут соединяться наглухо или через муфту свободного хода, которая обеспечивает одностороннюю передачу вращающего момента от привода к генератору. Если скорость вращения генератора превышает скорость вращения выходного вала привода, то муфта расцепляет валы, обеспечивая проскальзывание.

Если из-за неисправности привода скорость вращения одного из генераторов чрезмерно возрастает, то это приводит к следующим явлениям:

1. Неисправный генератор нагружается активной мощностью, т. е. принимает на себя всю активную мощность сети, если в состоянии ее покрыть.

2. Неисправный генератор доставляет активную мощность к исправным, работающим в двигательном режиме.

Если валы соединены наглухо, то мощность расходуется на вращение приводов. Если же валы соединены муфтой свободного хода, то идет небольшая мощность только на преодоление трения при проскальзывании муфты.

3. В результате чрезмерной перегрузки неисправный генератор может выпасть из синхронизма, вызывая большие колебания мощности в системе.

4. Уравнительная цепь измерителей активных мощностей стремится увеличить скорость вращения исправных генераторов.

5. Частота тока в сети значительно возрастает.

6. Напряжение остается неизменным, и исправные генераторы продолжают доставлять свою долю реактивной мощности в сеть.

Если из-за неисправностей привода скорость вращения одного из генераторов уменьшается, то происходит следующее:

1. Неисправный генератор разгружается от активной мощности.

2. Исправные генераторы принимают на себя активную мощность неисправного генератора.

3. Исправные генераторы доставляют активную мощность неисправному генератору, работающему в двигательном режиме.

Если валы соединены наглухо, то мощность расходуется на вращение привода. Если же валы соединены муфтой свободного хода, то небольшая мощность идет только на преодоление трения при проскальзывании муфты.

4. Неисправный генератор, работая в двигательном режиме, продолжает отдавать в сеть свою долю реактивной мощности.

5. При значительном снижении скорости привода неисправного генератора частота тока в сети уменьшается.

При наличии муфты свободного хода неисправный генератор целесообразно оставить подключенным к сети, так как он берет очень маленькую активную мощность на проскальзывание муфты, работая в то же время как компенсатор реактивной мощности.

Глава V

ЗАЩИТА И УПРАВЛЕНИЕ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

§ 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

При некоторых видах повреждений генератора и его фидера возможно повышение или понижение напряжения и частоты за пределы допустимых величин.

При коротких замыканиях внутри генератора или в его фидере всплески токов могут превосходить десятикратное номинальное значение и, несмотря на свою небольшую продолжительность, представлять тяжелый режим для самого генератора и связанных с ним элементов системы передачи и распределения электрической энергии.

Указанные явления оказывают существенное влияние на работоспособность энергосистемы и потребителей и вызывают необходимость применения соответствующей защиты.

Основными видами защиты генераторов переменного тока и их фидеров являются:

1. Максимальная токовая защита, реагирующая на величину тока к. з. в защищаемой цепи. Защита приходит в действие при превышении током заранее установленной величины и срабатывает без выдержки (токовая отсечка) или с выдержкой времени (максимальная защита).

2. Дифференциальная токовая защита от к. з., основанная на принципе сравнения токов в начале и в конце защищаемой цепи (продольная защита) или в двух параллельных линиях с одинаковыми параметрами (поперечная защита). Эта защита действует без выдержки времени (практически мгновенно), если разность сравниваемых токов превосходит заранее установленную величину.

3. Защита от минимального и максимального напряжения, действующая с выдержкой времени при отклонении напряжения за допустимые пределы.

4. Защита от понижения и повышения частоты, действующая с выдержкой времени при отклонении частоты за допустимые пределы.

Защита от к. з. генератора и его фидера должна удовлетворять основным требованиям, предъявляемым к защите питательных сетей в отношении селективности, быстродействия, чувствительности и надежности.

Максимальная токовая защита может осуществляться с помощью плавких предохранителей, биметаллических автоматов или токовых реле. Остальные виды защиты осуществляются только с помощью реле и называются релейными.

По способу действия исполнительного органа на главный контактор генератора реле делятся на реле прямого и косвенного действия. В реле прямого действия исполнительный орган механически действует на отключающий механизм (защелку) контактора. В реле косвенного действия исполнительный орган управляет цепью вспомогательного источника оперативного тока, питающего отключающее устройство контактора.

Схемы защиты с реле косвенного действия в сравнении со схемами защиты с реле прямого действия требуют оперативного тока, имеют более сложную схему и большую разветвленность оперативной сети, но обладают высокой точностью, чувствительностью и потребляют меньшую мощность, поскольку управляют только цепью оперативного тока.

В системах переменного тока получили распространение схемы защиты косвенного действия с использованием для оперативной цели сети постоянного тока или вспомогательных трансформаторов и генераторов управления.

При отключении поврежденного генератора от сети прекращается подача питания к месту короткого замыкания со стороны остальных генераторов. Однако ротор поврежденного генератора продолжает вращаться и при наличии возбуждения э. д. с., наводимые в обмотках его якоря могут вызвать недопустимые токи в месте повреждения. Поэтому в генераторах предусматриваются автоматические устройства, позволяющие быстро развозбуждать машину.

Гасить магнитное поле в генераторе можно путем короткого замыкания обмотки возбуждения, введением в цепь возбуждения активного сопротивления и др. Наиболее простым и распространенным является разрыв цепи возбуждения генератора.

При всех видах опасных повреждений защита должна выдавать сигналы на отключение возбуждения генератора, силовой цепи генератора от сети и привода, а также на включение сигнализации о выходе генератора из строя.

§ 2. МАКСИМАЛЬНО-ТОКОВАЯ РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА

Максимально-токовая релейная защита предназначена для отключения генератора от сети и гашения его поля возбуждения при коротком замыкании на его шинах или фидере, а также для выдачи сигнала об отказе генератора.

Одна из возможных схем защиты с токовым реле Т и реле времени В показана на рис. 5. 1. В схеме трансформаторы тока ТТ включены между началом статорной обмотки генератора и его нулевой точкой. В этом случае в зону защиты входят фидер генератора и его шины.

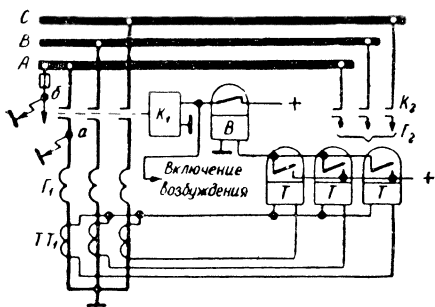


Рис. 5. 1. Схема максимальной защиты синхронного генератора с независимой выдержкой времени

При любых видах к. з. в зоне защиты в обмотках реле Т появляются токи, пропорциональные первичным фазным токам, реле срабатывает, отключает генератор от сети, гасит поле его возбуждения и выдает сигнал об отказе генератора.

Схема одинаково чувствительна ко всем видам коротких замыканий, поскольку минимум через одно реле всегда направляется полный ток повреждения.

Недостатком схемы является ее сравнительная сложность, обусловленная необходимостью установки реле времени, трансформаторов тока и токовых реле во всех трех фазах.

Для обеспечения селективности действия защиты фидера генератора при к. з. в фидерах потребителей (точка б) реле времени должно иметь выдержку времени большую, чем время срабатывания защиты любого из потребителей, что приводит к снижению быстродействия защиты генератора. Данная защита фидеров генераторов может найти применение в одногенераторных энергосистемах с потребителями малой мощности и быстродействующей защитой.

Следует иметь в виду, что в двухгенераторной системе такая защита будет действовать неселективно при к. з. в фидерах генераторов, например в точке а, особенно вблизи шин, так как токи обоих генераторов практически будут одинаковы. Поэтому сначала может отключиться генератор с исправным фидером, а затем генератор с поврежденным фидером, и система окажется обесточенной.

Работоспособность энергосистемы в этом случае может быть восстановлена с помощью повторного автоматического включения генераторов через небольшой промежуток времени. При этом, очевидно, генератор с замкнутым фидером не включится, поскольку

его напряжение не может восстановиться. Но введение повторного включения дополнительно усложнит систему защиты, и практически она перестает реагировать на перемежающиеся к. з.

§ 3. ПРОДОЛЬНАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ТОКОВАЯ ЗАЩИТА

Для изоляции, потерпевшего аварии генератора от сети и предотвращения дальнейшего развития последствий короткого замыкания генератора или его фидера применяется быстродействующая продольная дифференциальная токовая защита, два варианта схем которой представлены на рис. 5.2.

В каждую из фаз синхронного генератора последовательно включены два трансформатора тока по одному с каждой стороны обмотки якоря.

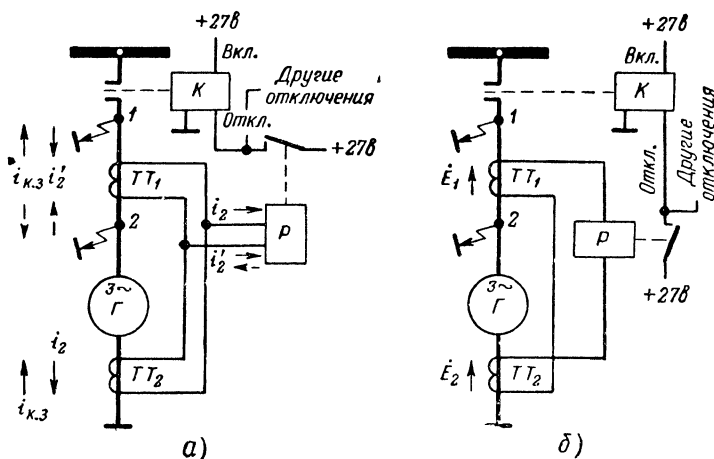


Рис. 5.2. Схемы продольной дифференциальной токовой защиты синхронных генераторов (однолинейное изображение):

а—с циркулирующими токами; б—с уравновешенными напряжениями

В нормальных режимах работы генератора (см. рис. 5.2, а) через максимально-токовое реле Р протекает разность токов i_2 и i'_2 вторичных обмоток трансформаторов тока. При идентичных трансформаторах разность токов равна нулю. Идентичность трансформаторов является важным условием, исключающим разбаланс токов i_2 и i'_2 и ложное срабатывание защиты.

При сквозном коротком замыкании вне зоны защиты (в точке 1) в первичных обмотках трансформаторов протекают токи короткого замыкания $i_{к.з}$ одного направления. В этом случае реле Р не срабатывает, так как разность токов i_2 и i'_2 равна нулю.

При коротком замыкании в зоне защиты (точка 2) в первичных обмотках трансформаторов протекают токи короткого замыкания разного направления, т. е. фаза тока одного из трансформато-

ров меняется на 180° . Через реле Р протекает сумма токов i_2 и i_2' . Реле срабатывает и мгновенно отключает возбуждение, привод и генератор от сети и включает сигнализацию о выходе генератора из строя.

В схеме дифференциальной токовой защиты с уравновешенными напряжениями (см. рис. 5.2, б) вторичные обмотки ТТ каждой фазы соединяются между собой так, что при одинаковых первичных токах э. д. с. вторичных обмоток направлены встречно. Обмотка токового реле включается последовательно с вторичными обмотками трансформаторов. Ток в обмотке реле будет равен

$$I_p = \frac{\dot{E}_1 - \dot{E}_2}{Z_{\Sigma}},$$

где $\dot{E}_1, \dot{E}_2$ — э. д. с. вторичных обмоток ТТ;
 Z_{Σ} — полное сопротивление вторичной цепи, включая сопротивление проводов, обмотки реле и вторичных обмоток ТТ.

При нормальном режиме работы или при к. з. вне защищаемой зоны $\dot{E}_1 = \dot{E}_2$, $I_p = 0$ и реле не действует. При к. з. в защищаемой зоне $\dot{E}_1 \neq \dot{E}_2$ и в реле появится ток, больший тока срабатывания ($I_p > I_{p.c.p.}$), реле срабатывает и отключит поврежденный генератор.

Дифференциальная защита является селективной и не требует никакого согласования с защитой других участков энергосистемы. В отличие от максимальной токовой защиты дифференциальная защита не требует выдержки времени для обеспечения селективности действия и выполняется быстродействующей, благодаря чему реагирует не только на металлические, но и на перемежающиеся к. з.

Ток срабатывания защиты $I_{c.з.}$ должен быть равен или меньше минимального тока к. з. в зоне защиты, т. е.

$$I_{c.з.} \leq I_{k.з. \min}.$$

Обычно $I_{c.з.} \approx 0,5 I_{k.з. \min} \approx 0,5 I_{k.з. \min} \text{ гер}$, так как минимальный ток к. з. имеет место при одностороннем питании шин сети только от данного генератора.

Защита не должна срабатывать при внешних к. з. и нормальных режимах работы. Это значит, что ток срабатывания реле должен быть больше тока небаланса $I_{\text{нб.}}$ протекающего по реле при указанных выше условиях и обусловленного неодинаковыми характеристиками трансформаторов ТТ.

Уменьшение токов небаланса достигается высокой степенью идентичности характеристик трансформаторов тока, а также применением насыщенных ТТ.

Продольная дифференциальная защита трехфазного генератора и его фидера может быть трехсистемной, выполненной с помощью трех токовых реле (по одному на каждую фазу), шести трансфор-

маторов тока и шести вспомогательных проводов. Эта защита реагирует на все виды к. з. в фидере и генераторе, за исключением замыканий витков в обмотке якоря. Однако наиболее целесообразно применение простой односистемной схемы с использованием одного реле и двух комбинированных трансформаторов (сумматоров), которые суммируют токи трех фаз и дают возможность получить однофазные токи или напряжения, используемые для срабатывания реле.

§ 4. ЗАЩИТА ПРИ АВАРИЙНОМ ОТКЛОНЕНИИ НАПЯЖЕНИЯ И ЧАСТОТЫ

На рис. 5.3 представлена схема защиты генератора переменного тока от перенапряжения, выполненная на полупроводниковых приборах. Действие схемы основано на свойствах кремниевых опорных диодов (стабилитронов) $СТ_1$ и $СТ_2$ отпирается при определенном значении обратного напряжения. Известно, что обратный ток диода очень мал (несколько микроампер) до тех пор, пока обратное напряжение на нем не достигнет напряжения срабатывания, после чего ток через диод резко возрастает и ограничивается только сопротивлением цепи. Это свойство диода позволяет использовать его в качестве элемента, определяющего уровень напряжения срабатывания защиты.

Выдержка времени перед срабатыванием выходного электромагнитного реле P обеспечивается с помощью конденсатора C_1 .

При нормальном напряжении генератора выпрямленное напряжение U_1 , питающее схему реле, ниже напряжения отпираания диода $СТ_1$. Конденсатор C_1 при этом практически разряжен через вентиль D и сопротивление R_2 . Необходимое минимальное напряжение срабатывания защиты устанавливается потенциометром Π .

При возникновении перенапряжения напряжение U_1 становится больше напряжения отпираания диода $СТ_1$. Последний отпирается и через него заряжается конденсатор C_1 . Время зарядки конденсатора до некоторого заданного напряжения определяется постоянной времени цепи конденсатора ($\tau = C_1 R_3$) и величиной перенапряжения.

Когда напряжение на конденсаторе достигнет напряжения отпираания диода $СТ_2$, последний отпирается и подает сигнал на двухкаскадный усилитель, выполненный на полупроводниковых трио-

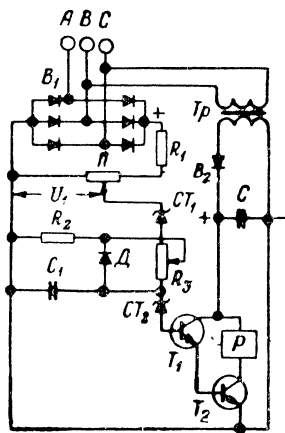


Рис. 5.3. Схема защиты от перенапряжения

дах T_1 и T_2 типа *n-p-n*. На выход усилителя включено реле Р, которое срабатывает при наличии перенапряжения в сети. Усилитель питается от генератора через трансформатор Тр и выпрямитель В₂.

Реостатом R_3 можно менять время заряда конденсатора C_1 до напряжения ступирания диода СТ₂, т. е. менять время срабатывания защиты при данной величине перенапряжения. При неизменном сопротивлении R_3 время заряда конденсатора будет тем больше, чем меньше перенапряжение, т. е. реле имеет падающую вольт-секундную характеристику срабатывания.

При кратковременных перенапряжениях в сети конденсатор C_1 не успевает зарядиться и исполнительное реле не срабатывает.

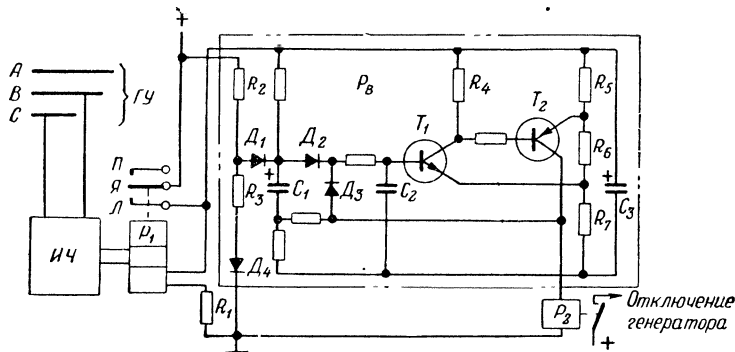


Рис. 5. 4. Схема защиты от повышения частоты

При исчезновении перенапряжения конденсатор быстро разряжается через диод Д и сопротивление R_2 . Сопротивление R_1 служит для температурной компенсации.

Принцип действия защиты от аварийного понижения напряжения аналогичен рассмотренному выше. Когда генератор достигнет минимально допустимого напряжения, реле Р срабатывает и остается под током в течение нормального режима работы. Реле отпускает при снижении напряжения и отключает соответствующий генератор и привод.

Защита от повышения частоты служит для отключения генератора от сети при отклонении его частоты за допустимые пределы. Защита состоит из измерителя частоты ИЧ, поляризованного реле Р₁, реле времени Р_в и выходного реле Р₂ рис. 5. 4.

Частота генератора контролируется измерителем частоты ИЧ с двойным резонансным контуром, принцип действия которого аналогичен принципу действия измерителя частоты в системе автоматического регулирования скорости привода. Разница заключается в настройке контуров и исполнительном органе.

Исполнительным органом является поляризованное реле Р₁, которое при повышении частоты срабатывает и подает питание на реле времени Р_в. Для исключения режима «звонка» в зоне сраба-

тивания реле P_1 применена отрицательная обратная связь R_1 , которая уменьшает коэффициент возврата.

Реле времени P_v представляет собой статическое устройство, использующее контур RC и транзисторы T_1 и T_2 .

При срабатывании реле P_1 напряжение подается в реле P_v , при этом начинают заряжаться конденсаторы C_1 и C_2 , и когда потенциал базы транзистора T_1 превысит потенциал эмиттера, транзистор открывается. В этом случае падение напряжения на сопротивлении R_4 создает отрицательное смещение на базе транзистора T_2 . Транзистор открывается, реле P_2 срабатывает и выдает сигнал на отключение генератора от сети.

Для обеспечения релейности характеристики реле времени в нем применена положительная обратная связь через диод D_3 . Чтобы на конденсаторе C_1 не появилось напряжение обратной полярности, на него подается постоянное смещение с делителя R_2R_3 через диод D_4 . На эмиттер транзистора T_2 подается смещение делителем R_5, R_6, R_7 .

Защита от снижения частоты работает аналогично защите от повышения частоты, причем при номинальной частоте реле P_1 находится под напряжением и отпускает при снижении частоты ниже допустимого уровня, при этом срабатывает промежуточное реле (которое на схеме не показано) и включает реле времени. После определенной выдержки времени реле P_2 подает сигнал на отключение генератора.

§ 5. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ ЗАЩИТЫ И УПРАВЛЕНИЯ ГЕНЕРАТОРАМИ

Системы защиты и управления источниками электрической энергии взаимно связаны и имеют общие элементы, которые устанавливают определенную логическую зависимость между входными и выходными сигналами. Для этой цели используются логические элементы «И», «ИЛИ», «НЕ» и их комбинации. Схемы логических элементов показаны на рис. 5. 5.

Каждый логический элемент может иметь несколько сигналов входа и выхода. Логическое значение сигналов принято обозначать «1», если действие происходит, и «0» — если оно не происходит.

Логическим элементом «И» называется такой элемент, выходной сигнал с которого снимается при наличии сигналов на всех его входах (см. рис. 5. 5, а). Значение выходного сигнала в символической записи будет иметь вид логического произведения значений входных сигналов:

$$F(U_{\text{вых}}) = U_1 \cdot U_2 \dots U_n.$$

Выходная функция равна 1, если все сомножители равны 1, и равна 0, если какая-либо из входных величин равна 0.

В логической схеме элемента «И» с полупроводниковыми приборами показаны триоды типа $n-p-n$, открывающиеся при подве-

дении положительного потенциала к его базе. Выходной сигнал $F(U_{\text{ВЫХ}})$ имеет место при закрытом триоде T_1 , когда сопротивление его эмиттер-коллекторного перехода максимально. В закрытое состояние триод T_1 приходит при открытом триоде T_2 , который открывается только при положительных сигналах на всех входах. Если хотя бы один из сигналов меньше заданного значения, то ба-

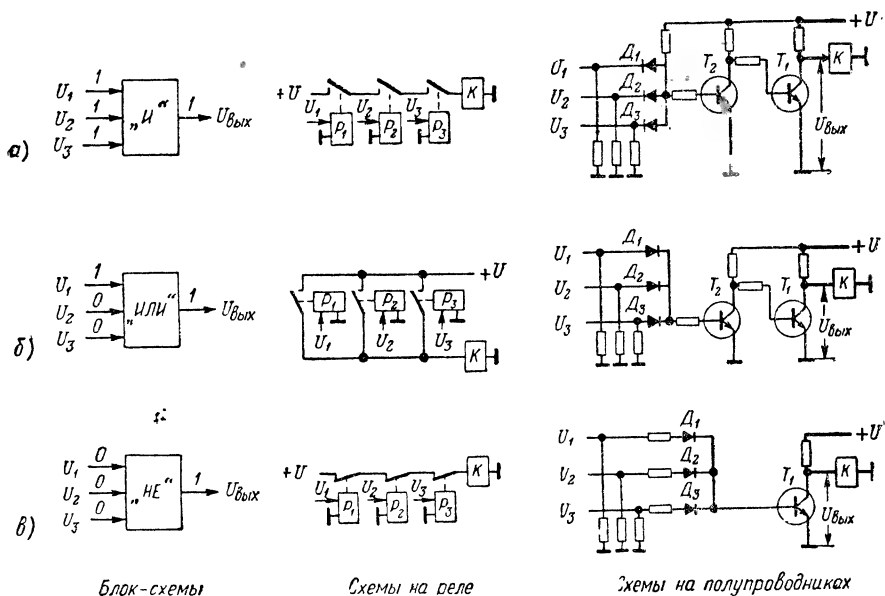


Рис. 5.5. Схемы логических элементов «И», «ИЛИ» и «НЕ»

за триода T_2 будет под напряжением наименьшего сигнала, и он останется закрытым, а триод T_1 — открытым и $U_{\text{ВЫХ}}=0$.

Логическим элементом «ИЛИ» называется такой элемент, выходной сигнал которого снимается при наличии сигнала хотя бы на одном из его входов (см. рис. 5.5, б). Значение выходного сигнала в символической записи имеет вид алгебраической суммы

$$F(U_{\text{ВЫХ}}) = U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_n.$$

Логическая сумма имеет значение 1, когда 1 равно хотя бы одно из слагаемых, и значение 0, если все слагаемые равны 0.

В логической схеме элемента «ИЛИ» на полупроводниковых приборах напряжение на выходе ($U_{\text{ВЫХ}}$) имеет место при закрытом триоде T_1 и открытом триоде T_2 . Для открывания триода T_2 достаточно сигнала хотя бы на одном из входов.

В логическом элементе «НЕ» выходной сигнал имеет место только при отсутствии сигналов на всех его входах (см.

рис. 5.5, в). Зависимость выходного сигнала от входных символически записывается в следующем виде:

$$F(U_{\text{вых}}) = \overline{U}_1 \cdot \overline{U}_2 \dots \overline{U}_n.$$

Если в произведении стоит символ $\overline{U}$, то он имеет значение 1, когда сигнал равен нулю ($U=0$), и значение 0, когда сигнал равен 1.

В логической схеме элемента «НЕ» с полупроводниковыми приборами напряжение на выходе $U_{\text{вых}}$ остается до тех пор, пока не появится сигнал на одном из входов.

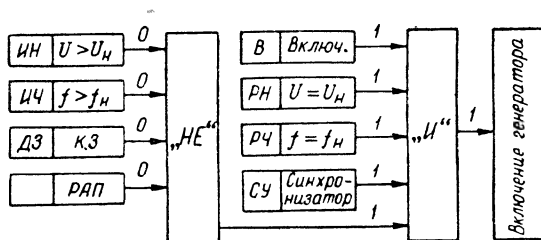
Рассмотрим отдельные блок-схемы защиты и управления генераторами переменного тока, работающими параллельно, определяя при этом их логические функции и взаимосвязи.

Включение генератора в сеть должно происходить при соблюдении следующих условий: выключатель находится в положении «Включено», напряжение и частота генератора номинальные, напряжение генератора синфазно с напряжением сети, отсутствуют перенапряжения, превышения частоты, к. з. в генераторе и его фидере и от бортовой сети отключен источник аэродромного питания. Блок-схема показана на рис. 5.6, а.

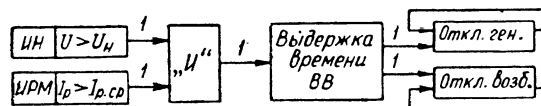
Защита при перенапряжении должна отключить от сети неисправный генератор, погасить его магнитное поле и не допускать повторного включения генератора в сеть, пока не будет устранена причина, вызывающая перенапряжение. Отключение происходит при следующих условиях: перенапряжении в сети, превышении реактивной мощностью, отдаваемой данным генератором, среднего значений реактивной мощности, приходящейся на генератор, и существовании режима перенапряжения свыше определенного промежутка времени. Блок-схема показана на рис. 5.6, б. Необратимость срабатывания защиты от перенапряжения показана на схеме обратной связью.

Защита при потере возбуждения, если она не обусловлена уменьшением скорости вращения, отключает генератор от сети необратимо. Отключение происходит, когда напряжение ниже определенного; реактивная мощность, отдаваемая данным генератором, меньше средней, приходящейся на каждый генератор; скорость вращения генератора (частота) не ниже определенного значения и длительность режима потери возбуждения превышает заданный промежуток времени. Блок-схема показана на рис. 5.6, в.

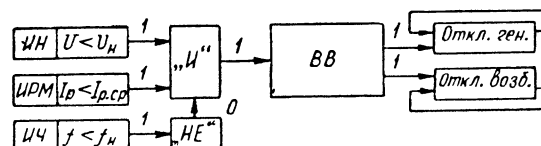
Защита от превышения частоты необратимо отключает генератор от сети и прекращает доступ воздуха или гидросмеси в привод для предупреждения разнотакта вращающихся частей. Отключение происходит, когда частота превышает допустимые пределы; активная мощность, отдаваемая данным генератором, выше средней активной мощности, приходящейся на генератор; и длительность существования режима превышения частоты свыше допустимой. Блок-схема показана на рис. 5.6, г.



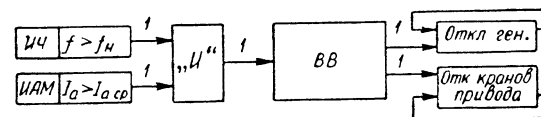
а) Включение



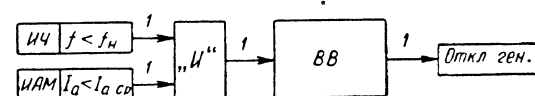
б) Защита от перенапряжения



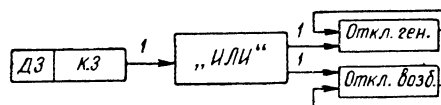
в) Защита от потери возбуждения



г) Защита от превышения частоты



д) Защита от понижения частоты



е) Защита от КЗ

Рис. 5.6. Блок-схемы управления и защиты генераторов

Защита от понижения частоты должна давать обратимый сигнал на отключение генератора, так как понижение частоты возможно при нормальной эксплуатации (проба авиадвигателя). Отключение происходит при следующих условиях: понижение частоты ниже допустимой; активная мощность, отдаваемая ге-

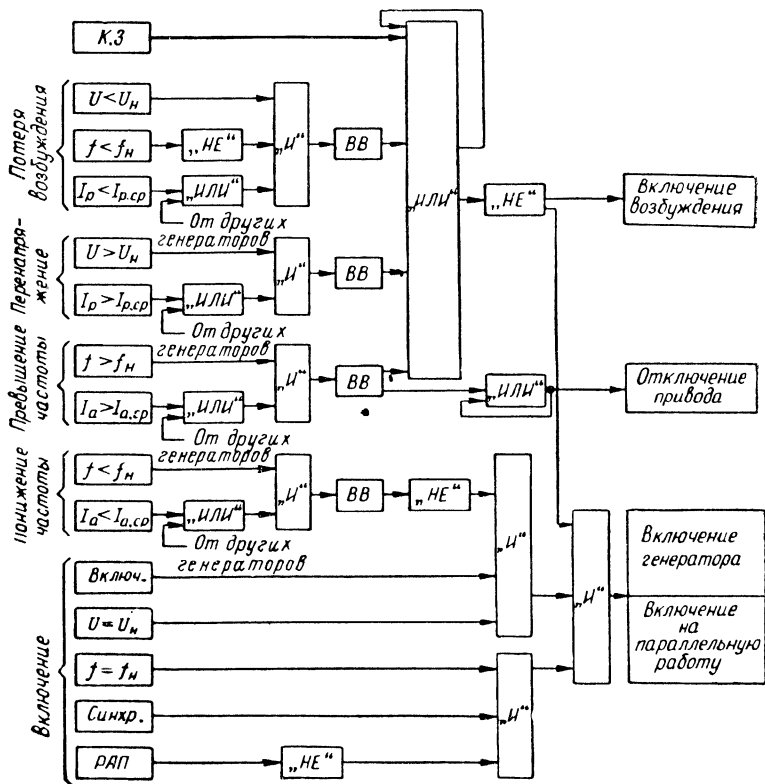


Рис. 5.7. Общая блок-схема управления и защиты генераторов

нератором, ниже средней активной мощности, приходящейся на один генератор; длительность существования режима понижения частоты превышает заданную выдержку времени. Блок-схема показана на рис. 5.6, д.

При защите от коротких замыканий внутри генератора или на его фидере генератор необратимо отключается от сети без выдержки времени. Блок-схема показана на рис. 5.6, е.

На основании рассмотренных выше отдельных блок-схем строится общая блок-схема защиты и управления генераторами (рис. 5.7). Как следует из рассмотрения схем, не все защиты вызывают необратимое отключение генератора. Поэтому выходы с не-

обратимых защит подаются не на силовой контактор, а на вход логического элемента «ИЛИ», с которого снимаются сигналы на отключение генератора, его возбуждения и на вход блокировки.

При разработке общей схемы защиты и управления возможно значительно сократить необходимое количество однотипных приборов, так как одни и те же логические элементы могут использоваться как для системы управления, так и для установленных защит.

В логических элементах «И», использующих диоды, вследствие значительной величины обратного тока нежелательно иметь больше трех входов. При необходимости применяется параллельное включение элементов «И».

Глава VI

СХЕМЫ ПЕРВИЧНЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

§ 1. СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ЗАЩИТЫ ЭНЕРГОСИСТЕМ

В энергосистемах переменного тока основная идея повышения надежности заключается в разделении каждой системы на две независимые части, каждая из которых может выполнять все функции системы в целом. В нормальных условиях обе части системы работают одновременно. Таким образом, в случае полного выхода из строя одной подсистемы, оставшаяся продолжает питать все потребители, обеспечивая высокую степень вероятности завершения полета. В системах по возможности применяются уже проверенные в эксплуатации элементы.

Ниже рассматриваются схемы энергосистем трехфазного переменного тока напряжением 200/115 в переменной и постоянной частоты с двумя, тремя и четырьмя генераторами. Принципы, заложенные в этих системах, могут быть распространены на энергосистемы с любым количеством генераторов.

Основная часть энергии переменного тока используется без преобразований для питания трехфазных и однофазных потребителей, часть ее трансформируется по напряжению до 36 и 28 в и некоторая доля преобразуется в постоянный ток напряжением 28 в с помощью трансформаторно-выпрямительных блоков.

В качестве первичных источников энергии получили распространение генераторы трехфазного переменного тока с заземленной силовой нейтралью. Для управления, регулирования и защиты используется аппаратура статического типа с применением магнитных усилителей и полупроводниковых элементов, схемы которых рассматривались выше.

Скорости вращения генераторов поддерживаются постоянными в основном с помощью дифференциальных гидромеханических и

пневмомеханических приводов постоянной скорости с реверсивной схемой регулирования.

В энергосистемах предусматривается защита от коротких замыканий, обрывов и отклонения параметров за допустимые пределы. Кроме того, предусматривается возможность отключения привода и генератора от авиадвигателя с помощью разъединительной муфты, управляемой из кабины, при возникновении опасных неисправностей. Обратное включение возможно только на земле.

В большинстве случаев в энергосистемах предусматривается аварийный генератор трехфазного переменного тока с приводом от вспомогательной силовой установки или ветрянки. Аварийный генератор используется для питания жизненно важных потребителей при отказе всех основных генераторов в полете. Генераторы, приводимые во вращение от вспомогательной силовой установки, в некоторых случаях включаются при взлете для увеличения надежности электропитания или для экономии тяги основных авиадвигателей. Они используются также на земле при неработающих авиадвигателях.

Бортсеть питается на земле трехфазным переменным током от аэродромного источника через розетку, при этом все бортовые источники автоматически отключаются от сети независимо от положения их выключателей. Наземный источник подключается к бортовой сети только в том случае, если частота, напряжение и последовательность фаз его находятся в допустимых пределах.

На рис. 6.1 показана типовая схема контроля синхронизации (с применением сигнальных ламп) и основных параметров энергосистем (с помощью частотомера, вольтметра и ваттметра). Приборы контроля параметров переключаются с одного генератора на другой пакетным переключателем. Ваттметр нормально показывает активную мощность, а при нажатии кнопки — реактивную. По показаниям ваттметра ведутся наблюдения за распределением активной и реактивной мощностей между генераторами.

Режим работы генераторов и их приводов задается установкой выключателей в соответствующее положение: раздельная, параллельная и групповая. После этого дальнейшее управление, регулирование, защита и контроль за работой энергосистемы выполняется автоматически. При отклонении режима работы системы от заданного загораются соответствующие сигнальные лампы.

В схемах первичных энергосистем показаны наиболее рациональные способы включения вторичных источников энергии — трансформаторов напряжения ТН, статических преобразователей СП и трансформаторно-выпрямительных блоков ТВБ. Статические преобразователи постоянного тока в трехфазный переменный используются как аварийные источники при отказе основной энергосистемы.

На рис. 6.2 представлена типовая схема управления и защиты энергосистемы переменного тока. Каждый генератор контактором K_1 — K_4 подключается к соответствующей главной шине ШГ, кото-

рая, в свою очередь, при параллельной работе может соединяться контакторами синхронизации K_c с шиной синхронизации ШС по схеме многолучевой звезды (см. рис. 5.1, раздел четвертый).

Контактор гашения поля $K_{г.п1}$ включается кратковременным нажатием переключателя B_1 в положение «Вкл.». $K_{г.п1}$ срабатывает, становится на защелку и обесточивается. При замыкании переключателя B_1 кратковременный импульс для подмагничивания возбуждателя подается по цепи B_1 —ВПЗ— $K_{г.п1}$.

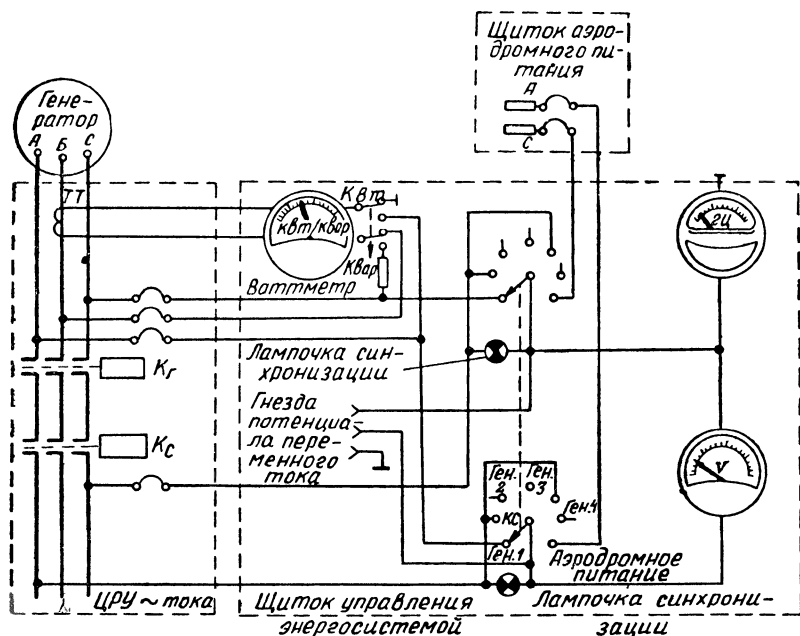


Рис. 6.1. Схемы приборов системы переменного тока

Кратковременным нажатием переключателя B_1 в положение «Откл.» можно выключить $K_{г.п1}$. При отключении $K_{г.п1}$ замыкаются его н. з. контакты в цепи питания отключающего электромагнита контактора K_1 , поэтому вслед за отключением $K_{г.п1}$ отключается и главный контактор K_1 .

Выключатель B_2 служит для управления контактором K_1 ; нормально этот выключатель находится в положении «Вкл.», при этом генератор включается и отключается автоматически. При включении генератора на обесточенную сеть питание на обмотку включающего электромагнита подается через выключатель B_2 , н. з. контакты контакторов K_2 — K_4 (остальные генераторы отключены), через н. р. контакты реле минимальных оборотов, н. р. контакты реле минимального напряжения (реле срабатывает при напряжении близком к номинальному) и н. з. контакты контактора K_p .

Генератор включается на параллельную работу с помощью синхронизатора, контакты которого P_c шунтируют н. з. контакты главных контакторов остальных генераторов. Синхронизатор включен на разность напряжений генератора и шины синхронизации ШС. В комплект аппаратуры каждого генератора входит отдельный синхронизатор.

При минимальных оборотах привода размыкаются контакты центробежного выключателя ЦВ, что приводит к отключению реле P_n ; последнее замыкает свои контакты в цепи обмотки отключающего электромагнита контактора K_1 и генератор отключается от сети.

В схеме предусмотрены следующие виды защит:

1. Продольная дифференциальная токовая защита от к. з. на фидере и внутри генератора с помощью трех трансформаторов тока TT_1 (в каждой фазе), трех трансформаторов тока TT_2 и трех реле P_d (см. схему рис. 5. 2). При к. з. внутри зоны защиты срабатывает одно реле P_d и подает напряжение на обмотку отключающего электромагнита $K_{г.пл}$, что приводит к гашению поля генератора и отключению его от сети.

2. Защита от перевозбуждения генератора с помощью трехфазного реле перенапряжения $P_u >$ (см. схему рис. 5. 3).

3. Защита от потери возбуждения с помощью трехфазного реле минимального напряжения $P_u <$. Это реле выключается при напряжении $0,9U_{ном}$ и имеет выдержку времени на отпусkanie контактов для исключения ложного срабатывания при кратковременных пониженных напряжениях.

4. Защита от обрыва фазы до включения генератора в сеть осуществляется с помощью реле минимального напряжения, а после включения — с помощью фильтра токов нулевой последовательности.

5. Защита от обратной активной мощности с помощью реле обратной мощности. Такая защита применяется в редких случаях.

6. Защита от чрезмерного повышения напряжения возбудителя с помощью теплового (биметаллического реле), что обеспечивает необходимую выдержку времени. Реле имеет самовозврат.

7. Защита от к. з. на генераторных шинах с помощью фильтра напряжения обратной последовательности.

Предусмотрено надежное питание схемы управления и защиты генераторов от трех источников тока:

— от сети постоянного тока напряжением 27 в;

— от сети генератора переменного тока через трансформаторно-выпрямительное устройство ВП;

— от подвозбудителя генератора. При отсутствии питания от первых двух источников реле $P_{р.пл}$ выключается и замыкает свои н. з. контакты в цепи питания от подвозбудителя.

Схема управления генераторами и наземным источником питания сблокирована так, что при включении одного генератора наземный агрегат отключается. Действительно, когда генератор приходит во вращение и возбуждается, то срабатывают реле мини-

Рис. 6.2. Типовая схема управления и защиты энергосистемы переменного тока:

ППС—привод постоянной скорости; Г₁—генератор; ОВГ—обмотка возбуждения генератора; В—возбудитель; ПВ—подвозбудитель; РН—регулятор напряжения; ИРМ—измеритель реактивной мощности; ИЧ—измеритель частоты; ИАМ—измеритель активной мощности; ИЧ—измеритель частоты; РЧ—регулятор частоты; МКЧ—механизм коррекции частоты; ЦВ—центробежный выключатель; Р_н—реле минимальных оборотов; К_{г.пл}—контактор гашения поля; К_г—главный контактор генератора; К_р—контактор розетки аэродвигателя; К_{с1}—К_{с4} контакторы синхронизации; К_з, К_з, К_д—вспомогательные контакты главных контакторов остальных генераторов; ТТ₁—ТТ₆—трансформаторы тока; Р_д—токовое реле про-

защиты энергосистемы переменного тока:

дольной дифференциальной защиты от к. з.; Т—понизающий трансформатор; Р_с—реле синхронизации; Р_и—реле минимального напряжения; Р_{и2}—реле перенапряжения; Р_{и3}—реле минимального напряжения остальных генераторов; Р_{и4}—реле включения резервного питания; Р_{и5}—реле обратной мощности; Р_{и6}—реле включения резервного питания цепей управления от возбуждения; ВП₁, ВП₂—выпрямители; ВП₃—вентиль; В₁—нажимной переключатель контактора гашения поля; В₂—выключатель управления генератором; ФН—фильтр напряжения обратной последовательности; Р_н—реле напряжения; Р_в—реле с выдержкой времени на замыкание контактов

мальных оборотов Р_и и реле минимального напряжения Р_и. При этом замкнутся н. р. контакты этих реле в цепи обмотки отключающего электромагнита контактора К_р и он отключается. Одновременно разомкнутся н. з. контакты этих реле в цепи обмотки включающего электромагнита контактора К_р, что исключает возможность включения последнего.

Рассмотренная схема управления и защиты энергосистемы применима и при раздельной работе генераторов, но в этом случае вместо аппаратуры для параллельной работы вводится аппаратура для автоматического переключения шин при отказе отдельных генераторов (см. § 2).

На рис. 6.2 показаны схемы включения регулятора напряжения РН и регулятора частоты РЧ с входящими в них измерителями напряжения ИН, реактивной мощности ИРМ, частоты ИЧ и активной мощности ИАМ и соответствующие связи с возбудителем и корректором частоты.

§ 2. ЭНЕРГОСИСТЕМА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА НЕСТАБИЛЬНОЙ ЧАСТОТЫ

На рис. 6.3 представлена схема трехфазной энергосистемы переменного тока напряжением 200/115 в нестабильной частоты. Источниками энергии являются два генератора трехфазного переменного тока, получающие вращение от авиадвигателей.

Генераторы работают раздельно каждый на определенную группу потребителей. В нормальном режиме генератор Г₂ подает энергию на шину Е, а генератор Г₁ — на шину Д и аварийную шину F.

Шина Д обеспечивает питанием ряд потребителей, включая трансформаторно-выпрямительный блок ТВБ₁, преобразующий переменный ток в постоянный напряжением 28 в.

Шина Е питает ряд потребителей, в том числе трансформатор 200/28 в, подающий энергию на шину Ж, с которой получает питание светотехническое оборудование.

С аварийной шины F получают питание жизненно важные потребители, в том числе аварийный ТВБ₂.

При повышении или понижении напряжения на клеммах какого-либо генератора свыше допустимых пределов его распределительная шина автоматически переключается на исправный генератор, а в кабине экипажа загорается сигнальная лампочка, указывающая какой из генераторов не работает.

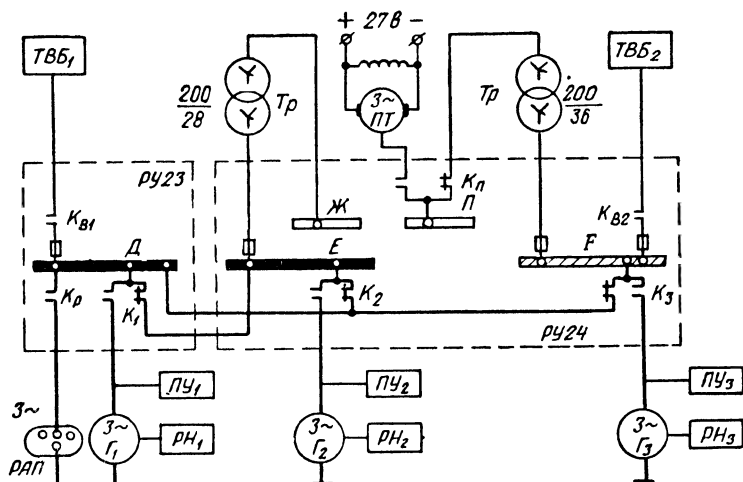


Рис. 6.3. Схема энергосистемы переменного тока нестабильной частоты (однолинейное изображение):

Г—генератор; К, К_П, К_В, К_Р—контакты генератора, преобразователя, выпрямителя и розетки; РН—регулятор напряжения; ПУ—панель управления; РАП—розетка аэродромного питания; ТВБ—трансформаторно-выпрямительный блок; ТП—преобразователь трехфазный; ТР—трансформатор

В системе электропитания имеются реле минимальной частоты, которые при снижении оборотов двигателя ниже 65% от номинальных отключают шины от соответствующего генератора и они автоматически подключаются на исправный.

Если генераторы установлены на одном авиадвигателе, то прекращают работу все потребители, за исключением обслуживающих двигатель. Эти потребители могут работать при снижении оборотов до 40%.

При отказе обоих генераторов аварийная шина F получает питание от аварийного генератора переменного тока, приводимого от ветрянки, которая в этом случае выпускается для работы от встречного потока воздуха. С шин F получают питание шина приборов П и аварийный выпрямитель ТВБ₂.

При нормальной работе пилотажные приборы получают питание переменным током 36 в частотой 400 гц от преобразователя.

При отказе преобразователя они автоматически подключаются на питание от шины F через трансформатор.

Аэродромное питание подключается к бортсети через розетку, при этом все распределительные шины автоматически отключаются от бортовых генераторов и подключаются на наземный источник энергии. Преобразователь также отключается, а приборы получают питание с шины F через трансформатор.

Энергосистема надежно обеспечивает питанием потребители переменного тока. Качество энергии по частоте наилучшее при номинальных оборотах двигателя и сохраняется в допустимых пределах при небольшом диапазоне оборотов двигателя.

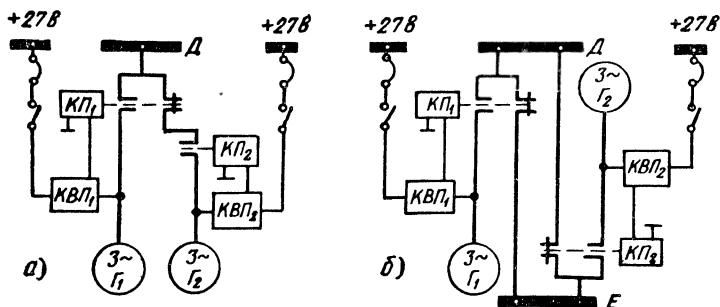


Рис. 6.4. Схемы автоматического резервирования питания потребителей в двухгенераторных системах

Энергосистема с двумя генераторами применима на летательных аппаратах с одним и двумя двигателями. Однако она с успехом может применяться и на летательных аппаратах с несколькими двигателями, при этом надежность ее будет возрастать с увеличением числа двигателей и генераторов.

Из рассмотренного следует, что генераторы, получающие вращение непосредственно от авиадвигателей, работают в энергосистемах переменного тока раздельно. Для обеспечения бесперебойного питания потребителей в энергосистемах предусматривается не менее чем двойное питание шин распределительных устройств; 100 %-ное резервирование генераторной мощности; автоматическое подключение резервных генераторов вместо вышедших из строя основных за минимально короткое время; невозможность включения генераторов на параллельную работу при нормальных условиях и любых отказах; исключение перегрузки генераторов при отказе нескольких из них в полете и при поочередном запуске авиадвигателей на земле.

Рассмотрим несколько возможных вариантов схем автоматического резервирования питания потребителей при раздельной работе генераторов, которые обеспечивают решение указанных задач.

На рис. 6.4 показаны схемы автоматического резервирования питания потребителей в системах с двумя генераторами.

В схеме *а* оба выключателя нормально замкнуты, оба генератора возбуждены и контакторы КП₁ и КП₂ включены. При этом генератор Г₁ является основным и питает нагрузки, а генератор Г₂ находится в горячем резерве. Если по какой-либо причине генератор Г₁ отключается, то контактор КП₁ своими н. з. контактами подключит резервный генератор к шине. Одновременное

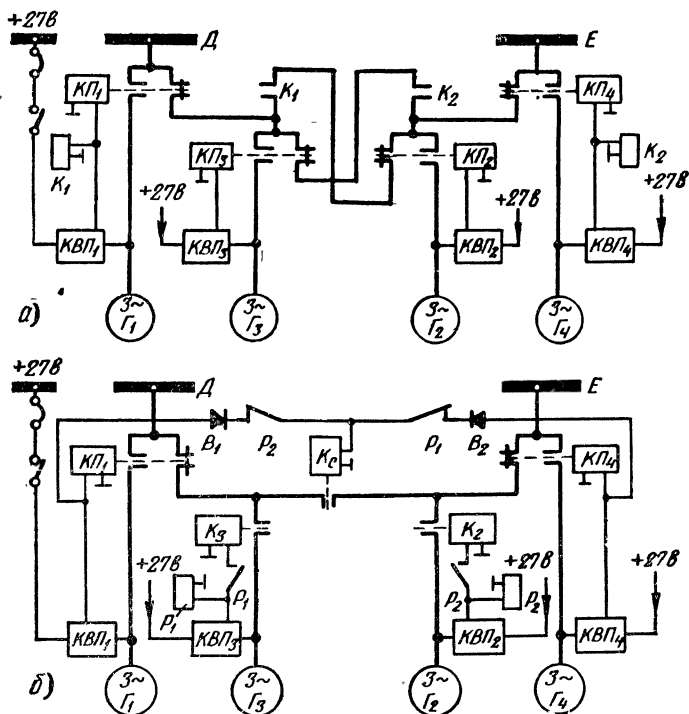


Рис. 6. 5. Схемы автоматического резервирования питания потребителей в четырехгенераторных системах

включение генераторов на шину здесь невозможно; повреждение цепей постоянного тока генератора Г₁ не препятствует включению генератора Г₂.

В схеме *б* нагрузки разнесены на две шины Д и Е. В нормальном режиме генератор Г₁ питает шину Д, а генератор Г₂ — шину Е. При выходе из строя любого генератора отключается соответствующий КП, что приводит к объединению обеих шин, а их питание обеспечивает оставшийся генератор.

На рис. 6. 5 приведены схемы автоматического резервирования питания потребителей в четырехгенераторных системах, которые обеспечивают питанием все потребители при выходе из строя любых двух генераторов.

В схеме *а* при нормальной работе системы все генераторы возбуждены, контакторы КП₁—КП₄ и К₁, К₂ включены, шина Д питается от генератора Г₁, а шина Е — от генератора Г₄, генераторы Г₂ и Г₃ находятся в горячем резерве. При выходе из строя генератора Г₁ шина Д питается от генератора Г₃, а при выходе из строя генераторов Г₁ и Г₃ — от генератора Г₂.

При выходе из строя генератора Г₄ шина Е питается от генератора Г₂, а при выходе из строя генераторов Г₂ и Г₄ — от генератора Г₃.

Перегрузка резервных генераторов Г₂ и Г₃ при одновременном выходе из строя трех генераторов предотвращается контакторами К₁ и К₂. Например, при выходе из строя генераторов Г₁, Г₂ и Г₄ генератор Г₃ питает только шину Д, цепь питания шины Е прерывается контактором К₁. Аналогично при выходе из строя генераторов Г₁, Г₃ и Г₄ генератор Г₂ питает только шину Е, а цепь питания шины Д прерывается контактором К₂.

На параллельную работу в этой схеме генераторы включаться не могут благодаря применению переключающих контактов КП₁—КП₄. Резервные генераторы включаются независимо от исправности питания цепей управления основных генераторов. Таким образом, схема полностью удовлетворяет всем основным требованиям.

Схема *б* аналогична схеме *а*, но отличается меньшим количеством силовой коммутационной аппаратуры. Схема состоит из двух групп генераторов, по два генератора в каждой группе. Предусмотрена возможность соединения групп связывающим контактором К_с, обмотка которого может получать питание по двум цепям:

— от КВП₁ через блокирующий вентиль В₁ и н. з. контакты реле Р₂,

— от КВП₄ через блокирующий вентиль В₂ и н. з. контакты реле Р₁.

При нормальной работе все генераторы возбуждены, контакты КП₁, КП₄, К₃, К₂ и реле Р₁, Р₂ включены, контактор К_с выключен, шина Д питается от генератора Г₁, а шина Е — от генератора Г₄.

При выходе из строя генератора Г₁ шина Д питается от генератора Г₃, а контактор К_с выключен. При выходе из строя генераторов Г₁ и Г₃ и исправном генераторе Г₄ через замкнутые контакты реле Р₁ включается контактор К_с и шина Д получает питание от генератора Г₂. Если одновременно выйдут из строя генераторы Г₁, Г₂ и Г₄, контактор К_с не будет включен и генератор Г₂ будет питать только шину Е. Аналогично контактор К_с включится при выходе из строя генераторов Г₂ и Г₄ и исправном генераторе Г₁, при этом генератор Г₃ подключится к шине Е. Нормально-разомкнутые контакты реле Р₁ и Р₂ в цепях обмоток контакторов К₂ и К₃ исключают кратковременное включение генераторов Г₂ и Г₃ на параллельную работу.

§ 3. ЭНЕРГОСИСТЕМА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С РАЗДЕЛЬНОЙ РАБОТОЙ ГЕНЕРАТОРОВ

На рис. 6.6 представлена схема энергосистемы трехфазного переменного тока напряжением 200/115 в постоянной частотой 400 гц с раздельной работой генераторов на определенную группу потребителей. Источником энергии служат три трехфазных генератора, получающие вращение от приводов постоянной скорости.

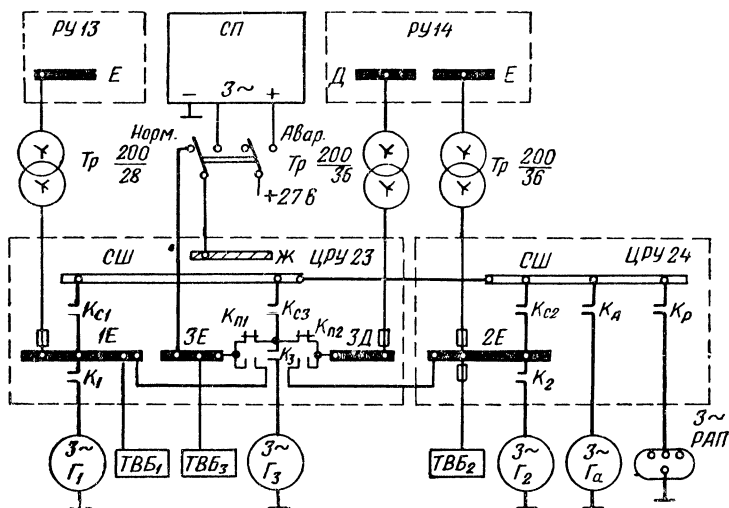


Рис. 6.6. Схема энергосистемы переменного тока с раздельной работой генераторов (однолинейное изображение).

Аварийное питание трехфазным переменным током осуществляется от генератора Г_а, установленного на вспомогательном автономном агрегате, который запускается в полете при отказе основных генераторов. Сверхаварийное питание осуществляется от статического преобразователя СП постоянного тока в трехфазный переменный. Наземное питание переменным током подается через аэродромную розетку РАП.

В схемах предусматриваются блокировки, не допускающие параллельной работы основных, аварийных и наземных источников энергии при любых комбинациях включения. Напряжение понижается с 200 до 36 и 28 в трансформаторами напряжения Тр и подается в распределительные устройства РУ13 и РУ14.

При нормальной работе генератор Г₁ питает шину 1Е, генератор Г₂ — шину 2Е, а генератор Г₃ — шину 3Е, 3Д и аварийную шину Ж.

Шина генератора Г₃ разделена на две части 3Е и 3Д с тем, чтобы при выходе из строя одного генератора два других могли питать всю нагрузку, приблизительно разделенную пополам. Важней-

шие дублирующие потребители электроэнергии разделены между шинами 1Е и 2Е.

В аварийных случаях нагрузки переключаются следующим образом. При повреждении генератора G_1 выключается контактор K_1 и его генератор отключается от сети. Одновременно срабатывают контакторы $K_{с1}$ и $K_{с3}$ и переключающий контактор $K_{п2}$. Шина 1Е подключается к генератору G_3 , а шина 3Д — к генератору G_2 .

При выходе из строя генератора G_2 выключается контактор K_2 , включаются контакторы $K_{с2}$ и $K_{с3}$ и переключается контактор $K_{п1}$. Шина 2Е оказывается подключенной к генератору G_3 , а шина 3Е — к генератору G_1 .

При повреждении генератора G_3 выключается контактор K_3 и переключаются контакторы $K_{п1}$ и $K_{п2}$. При этом шина 3Е подключается к генератору G_1 , а шина 3Д — к генератору G_2 .

При отказе двух любых генераторов питанием переменным током обеспечиваются шины 1Е и 3Е или 3Д и 2Е. В этом случае всегда обеспечивается питание аварийной шины Ж: в первом случае от шины 3Е, а во втором — от статического преобразователя. Нагрузки между шинами распределены так, что при выходе из строя двух генераторов полет может продолжаться в любых условиях.

На случай отказа автоматической системы переключения переменного тока предусмотрено ручное переключение, осуществляемое тремя переключателями. При выходе из строя какого-либо привода постоянной скорости или генератора загорается соответствующая сигнальная лампочка, информирующая экипаж о повреждении и указывающая, какой переключатель необходимо использовать для переключения шин. Переключатели смонтированы таким образом, что невозможно одновременно переключить более одного переключателя.

§ 4. ЭНЕРГОСИСТЕМА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТОЙ ГЕНЕРАТОРОВ

На рис. 6.7 представлена схема энергосистемы переменного трехфазного тока напряжением 200/115 в постоянной частотой 400 гц. Источниками энергии служат четыре трехфазных генератора, получающие вращение от приводов постоянной скорости. На земле бортсеть питается трехфазным переменным током от аэродромного источника с помощью розетки.

Энергия от генераторов подается к соответствующим генераторным шинам в центральные распределительные устройства (ЦРУ), с которых непосредственно распределяется по потребителям и вторичным распределительным устройствам (РУ). Контактторы K подключают генераторы к основным шинам, а контакторы K_c включают их на параллельную работу. В системе предусматривается параллельная работа генераторов, однако нагрузки распределяются таким образом, чтобы каждый генератор мог снабжать свою груп-

пу потребителей при раздельной работе. Шины Д и Е вторичных РУ подключаются к главным шинам контакторами K_{Π} . При пожаре, возникшем из-за неисправности энергосистемы, бортинженер нажатием общей планки выключателей отключает одновременно все контакторы K_{Π} . Если после этого источник пожара не окажется изолированным, то отключают связывающие контакторы K_c и

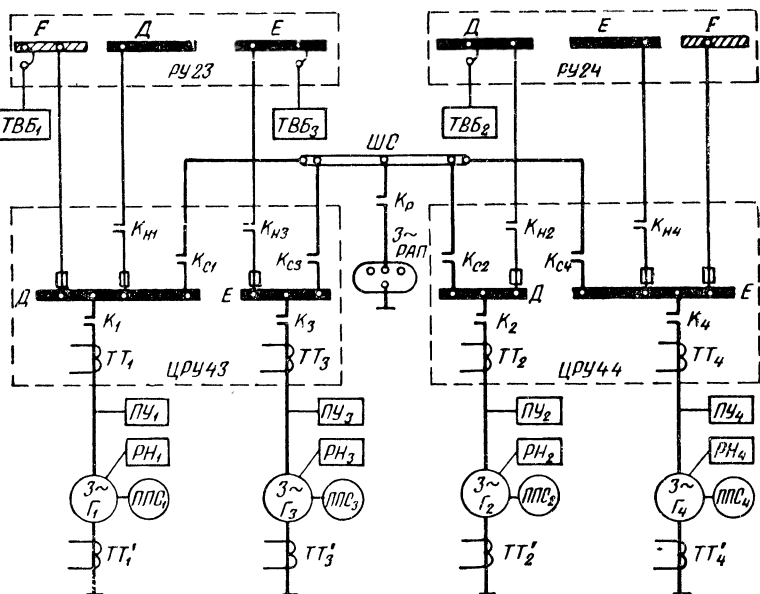


Рис. 6. 7. Схема энергосистемы переменного тока с параллельной работой генераторов (однолинейное изображение):

Γ —генератор; K, K_{Π}, K_c, K_{Π} —контакторы генератора, нагрузки, синхронизации и розетки аэродромного питания; $РН$ —регулятор напряжения; $ПУ$ —панель управления и защиты генератора; $ТТ$ и $ТТ'$ —трансформаторы тока дифференциальной защиты; $РАП$ —розетка аэродромного питания; $ШС$ —шина синхронизации; $ТВБ$ —трансформаторно-выпрямительный блок; $ППС$ —привод постоянной скорости

тем самым изолируют генераторы друг от друга. Далее в зависимости от необходимости отключаются последовательно генераторы Γ_2 и Γ_3 и, наконец, поочередно генераторы Γ_1 и Γ_4 . При этом аварийные шины F , питающие особенно ответственные потребители, находятся под током до отключения соответствующего генератора.

При включенных выключателях управление и защита генератора осуществляется автоматически панелью управления ($ПУ$), которая выдает соответствующие сигналы на контакторы. Если генераторы включены на параллельную работу, то при аварийных режимах соответствующая панель автоматически изолирует поврежденный генератор от общей системы и далее в зависимости от характера повреждений отключает его.

§ 5. ЭНЕРГОСИСТЕМА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ДВУМЯ АВТОНОМНЫМИ СИСТЕМАМИ

Вся энергосистема трехфазного переменного тока напряжением 200/115 в постоянной частотой 400 гц разделена на две автономные системы. Источником энергии в ней служат два трехфазных генератора переменного тока, получающие вращение от приводов постоянной скорости.

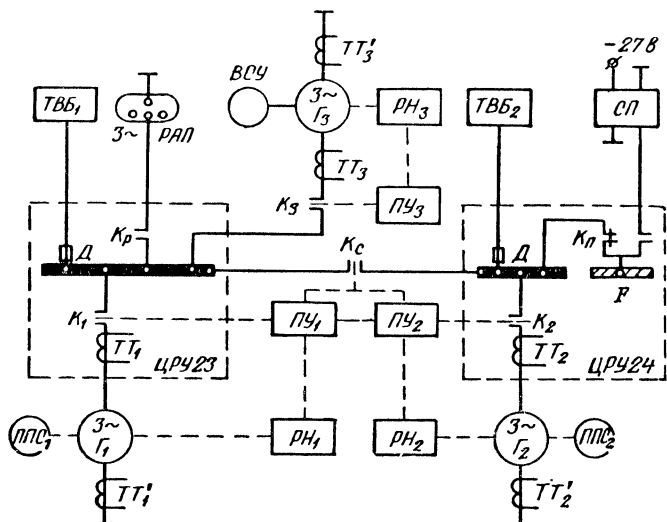


Рис. 6.8. Схема энергосистемы переменного тока с двумя автономными системами (однолинейное изображение):

Г—генератор; К, К_с, К_р, К_п—контакты генератора, синхронизации, розетки, преобразователи; РП—регулятор напряжения; ПУ—панель управления и защиты; ТТ—ТТ'—трансформаторы тока дифференциальной защиты; РАП—розетка аэродромного питания; СП—статический преобразователь; ВСУ—вспомогательная силовая установка; ППС—привод постоянной скорости

Принципиальная схема энергосистемы показана на рис. 6.8. Каждый генератор питает отдельную шину переменного тока. Обе шины при нормальной работе изолированы друг от друга, но автоматически подключаются одна к другой при выходе из строя одного из генераторов, а также когда питание обеспечивает генератор, приводимый от ВСУ или наземного источника. Так как мощность всех потребителей не превышает 50% суммарной мощности генераторов, то один генератор обеспечивает нормальную работу всех потребителей.

Для увеличения надежности бесперебойного питания потребителей в полете предусмотрена возможность объединения систем с помощью контактора К_с для параллельной работы генераторов.

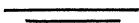
Для равномерного распределения нагрузки между генераторами при параллельной работе в каждом приводе генератора имеется

магнитная головка подстройки режима. Соответствующий сигнал управления этими головками подается от регуляторов нагрузки.

Потребители, обслуживающие посадку л. а. при отказе авиадвигателей и часть потребителей при взлете, питаются от вспомогательной силовой установки (ВСУ) с аварийным генератором переменного тока. Наземное питание переменным током осуществляется через аэродромную розетку.

Энергосистема спроектирована таким образом, что выход из строя одного из элементов не приводит к выходу из строя обоих каналов питания, что значительно повышает надежность энергоснабжения потребителей, а распределение энергии только с шин ЦРУ существенно повышает стабильность напряжения на клеммах потребителей.

В принципе энергосистема может быть разбита на две автономные системы с любым количеством генераторов, обеспечивая при этом параллельную работу их внутри систем и между системами. При этом надежность каждой автономной системы возрастает с увеличением числа генераторов.



РАЗДЕЛ ШЕСТОЙ

ВТОРИЧНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Глава I

ВТОРИЧНЫЕ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

§ 1. РОЛЬ ВТОРИЧНОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

На летательных аппаратах наряду с основной первичной энергосистемой постоянного тока напряжением 27 в существуют вторичные энергосистемы однофазного и трехфазного переменного тока постоянной частоты. Мощность таких энергосистем доходит до десятков *квa*.

Переменный ток постоянной частоты необходим для питания: радио- и радиолокационного оборудования, пилотажно-навигационных систем, систем автоматического управления, следящих систем, дистанционных передач показаний, усилительных устройств, различных видов приборов и других потребителей.

Кроме того, имеются потребители, требующие для своей работы переменный ток любой частоты. К таким потребителям относятся обогревательные элементы стекол, импульсные источники света, люминесцентное освещение и др.

В качестве источников энергии в этих системах применяются преобразователи постоянного тока в однофазный и трехфазный переменный ток постоянной частоты. Наибольшее распространение получили вращающиеся преобразователи. Однако за последнее время начинают внедряться статические преобразователи, обладающие повышенной надежностью.

Во вторичных энергосистемах переменного тока параллельная работа преобразователей не нашла применения ввиду ее сложности и недостаточной надежности. Широкое распространение получили системы с автоматическим включением резервного преобразователя взамен вышедшего из строя основного.

Преобразователь может питать отдельный потребитель или группу потребителей. Ввиду большого количества маломощных потребителей групповое питание получает основное распространение. Оно обеспечивает наиболее рациональную загрузку преобра-

зователя в течение всего полета и позволяет снизить мощность и вес основных и резервных преобразователей.

Однофазные преобразователи должны поддерживать постоянными: напряжение $115 \text{ в} \pm 3\%$ и частоту $400 \text{ гц} \pm 5\%$, при этом напряжение на клеммах потребителей должно быть $115 \text{ в} \pm 5\%$.

Трехфазные преобразователи должны поддерживать постоянными: напряжение $36 \text{ в} \pm 3\%$ и частоту $400 \text{ гц} \pm 2\%$, при этом напряжение на клеммах потребителей — $36 \text{ в} \pm 5\%$.

Для питания некоторых потребителей устанавливаются преобразователи с повышенной точностью напряжения и частоты ($\pm 0,05\%$).

§ 2. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА В ПЕРЕМЕННЫЙ

В качестве источников энергии во вторичных энергосистемах переменного тока получили распространение электромашинные и статические преобразователи, преобразующие постоянный ток напряжением 27 в в переменный ток с постоянной частотой 400 гц и напряжениями 115 в (однофазный) и 36 в (трехфазный).

На качество выходных параметров преобразователя значительное влияние оказывает стабильность входного напряжения, поэтому они должны получать питание непосредственно с распределительных шин ЦРУ первичной энергосистемы, где при эксплуатации обеспечивается минимальное отклонение напряжения от номинального значения.

Электромашинные преобразователи МА, ПО и ПТ состоят из двигателя постоянного тока параллельного или смешанного возбуждения, генератора переменного тока — синхронного, индукторного или магнитоэлектрического типа и коробки управления. Для автоматического регулирования выходных параметров — частоты и напряжения в нем предусмотрены регулятор скорости вращения и регулятор напряжения.

Двигатель и генератор заключены в общий корпус и связаны единым валом, а коробка управления закрепляется на корпусе машины. Агрегаты выполняются в защищенном исполнении с самоохлаждением.

Электрические свойства преобразователей оцениваются семейством рабочих характеристик (рис. 1.1), показывающих зависимость напряжения U_2 , частоты f , потребляемого тока I и к. п. д. η от величины нагрузки P_2 при неизменном напряжении питания $U = \text{const}$ и постоянном $\cos \varphi$.

Однофазные преобразователи типа МА выпускаются мощностью от 100 до 1500 *ва*. В них применяются индукторные генераторы, основное преимущество которых в простоте конструкции. Однако вследствие плохого использования в генераторах активных материалов и несинусоидальности формы кривой выходного напряжения ($K_{\phi} \approx 20\%$) они имеют ограниченное применение.

Однофазные преобразователи типа ПО выпускаются мощностью от 100 до 6000 *ва*. В них применяются электродвигатели с тремя видами обмоток возбуждения: шунтовой ШО, серийной СО и управляющей УО, являющейся выходом схемы автоматического регулирования частоты, и однофазные синхронные генераторы с внешними полюсами и вращающейся якорной обмоткой.

Основные технические данные однофазных преобразователей приведены в табл. 1.1.

Трехфазные преобразователи выпускаются мощностью от 56 до 3000 *ва*. В преобразователях используются электродвигатели со смешанным возбуждением и трехфазные магнитоэлектрические генераторы, обладающие высокой надежностью благодаря отсутствию скользящих контактов и хорошей формой кривой выходного напряжения ($K_{\phi} < 10\%$). В преобразователях мощностью 1,5 *кВа* и выше применяются синхронные генераторы с электромагнитным возбуждением.

Преобразователь типа ПАГ-1Ф мощностью 56 *ва* применяется для индивидуального питания потребителей. Преобразователи типа ПТ выпускаются мощностью от 70 до 3000 *ва* и используются для индивидуального и группового питания потребителей.

Основные технические данные трехфазных преобразователей приведены в табл. 1.2.

Статические преобразователи постоянного тока в переменный частотой 400 *гц* выпускаются двух типов: СПО — однофазные с напряжением 115 *в* и СПТ — трехфазные с напряжением 36 *в*. В сравнении с машинными преобразователями они имеют повышенную надежность, но значительный вес и искажение формы кривой напряжения, что является существенным недостатком. Поэтому статические преобразователи, как правило, изготавливаются небольшой мощности и используются в качестве аварийных источников переменного тока.

Блск-схема однофазного статического преобразователя типа СПО представлена на рис. 1.2. Питание преобразователя постоянным током напряжением $27 \text{ в} \pm 10\%$ подается на вход стабилизатора напряжения, имеющего выключающий транзистор, который срабатывает при повышении входного напряжения выше допустимого предела, защищая тем самым преобразователь от перенапряжения. В аварийном режиме преобразователь допускает снижение входного напряжения до 20 *в*, последнее соответствует напряжению значительно разряженной аккумуляторной батареи.

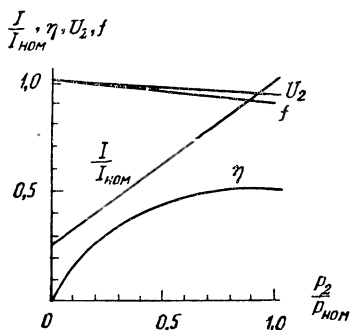


Рис. 1.1. Рабочие характеристики преобразователя

Основные технические данные преобразователей

Тип преобразователя	Номинальные данные									
	Мощность $P_{\text{ном}}$, вА	Напряжение U В		Ток I А		Пусковой ток $I_{\text{п}}$, А	Скорость n об/мин · 10 ³	Частота ω	$\cos \varphi$	к.п.д
		двигателя	генератора	двигателя	генератора					
ПО-250А	250	$27 \pm 10\%$	$115 \pm 3\%$	24,5	2,17		12,0	$400 \pm 4\%$	0,9	0,34
ПО-500А	500	$27 \pm 10\%$	$115 \pm 4\%$	41,0	4,35	300	12,0	$400 \pm 5\%$	0,9	0,405
ПО-750А	750	$27 \pm 10\%$	$115 \pm 4\%$	56,0	6,51	415	12,0	$400 \pm 5\%$	0,9	0,445
ПО-1500	1500	$27 \pm 10\%$	$115 \pm 4\%$	104,0	13,0	680	8,0	$400 \pm 7\%$	0,9	0,52
ПО-3000	3000	$27 \pm 10\%$	$115 \pm 4\%$	190,0	26,1	1240	8,0	$400 \pm 3\%$	0,9	0,52
ПО-3000А	3000	$27 \pm 10\%$	$115 \pm 4\%$	185,0	26,1		8,0	$400 \pm 4\%$	0,85	0,51
ПО-4500	4500	$27 \pm 10\%$	$115 \pm 4\%$	280,0	39,1	1550	8,0	$400 \pm 7\%$	0,9	0,52
ПО-6000	6000	$27 \pm 10\%$	$115 \pm 4\%$	370,0	52,1	2040	8,0	$400 \pm 7\%$	0,9	0,54

постоянного тока в однофазный переменный

Вес G кг	$G/P_{\text{ном}}$ кг/кВа	Высота полета H км	Дли- на	Ши- рина	Вы- сота	Регулирующая аппаратура		
						регулятор напряже- ния	коробка переключе- ния	выносное сопротив- ление
			мм					
8,0	32,0	8	245	160	215		КРП-1 АПП-1	
12,5	25,0	16	336	179	250		КРП-1 АПП-1	
14,8	19,8	16	336	179	259		КРП-1 АПП-1	
23,5	15,7	15	487	185	291		КРП-1 АПП-1	РС-4
37,1	12,3	15	467	227	328	Р-25В	КРП-1 АПП-1	РС-4
39,5	13,1	15	457	213	317	Р-27В	КРП-1 АПП-1 КСУ-3000А	РС-4
47,0	10,4	15	535	195	337	Р-25В	КРП-1 АПП-1	РС-4
58,5	9,8	15	582	252	357	Р-25В	КРП-1 АПП-1	РС-4

Основные технические данные преобразователей

Тип преобразователя	Номинальные данные									
	Мощность $P_{\text{ном}}, \text{ва}$	Напряжение U в		Ток I а		Пусковой ток $I, \text{а}$	Скорость n $\text{об/мин} \cdot 10^3$	Частота гц	$\cos \varphi$	к.п.д
		двигателя	генератора	двигателя	генератора					
ПАГ-1Ф	56	$27 \pm 10\%$	$36 \pm 10\%$	3,5	0,65		8,0	400	0,65	
ПТ-70Ц	70	$27 \pm 10\%$	$36^{+3}_{-1}\%$	5,2	1,12		12,0	$400^{+2}_{-3}\%$	0,6	0,3
ПТ-125Ц	125	$27 \pm 10\%$	$36^{+5}_{-1,5}\%$	8,0	2,0		12,0	$400 \pm 2\%$	0,6	0,35
ПТ-200Ц	200	$27 \pm 10\%$	$36^{+4}_{-1,5}\%$	14,0	3,2		8,0	$400 \pm 2\%$	0,6	0,317
ПТ-500Ц	500	$27 \pm 10\%$	$36 \pm 5\%$	37,0	8,0		12,0	$400 \pm 2\%$	0,8	0,4
ПТ-750Ц	750	$27 \pm 10\%$	$36 \pm 2\%$	49,4	12,0		12,0	$400 \pm 2\%$	0,8	0,45
ПТ-1000Ц	1000	$27 \pm 10\%$	$36 \pm 5\%$	60,5	16,1		12,0	$400 \pm 2\%$	0,8	0,49
ПТ-1500Ц	1500	$27 \pm 10\%$	$37 \pm 1,5\%$	87,0	24,0	680	8,0	$400 \pm 2\%$	0,8	0,51
*ПТ-3000Ц	3000	$27 \pm 10\%$	$208 \pm 3\%$	180,0	8,35		8,0	$400 \pm 2\%$	0,85	

* Продув встречным потоком воздуха 57 л/сек.

Таблица 1.2

постоянного тока в трехфазный переменный

Вес G кг	$G/P_{\text{ном}}$ кг/кВа	Высота полета H км	Дли- на	Ши- рина	Вы- сота	Регулирующая аппаратура		
						регулятор напряже- ния	коробка переключе- ния	выносное сопротив- ление
			мм					
3,5	62,5	15	240	114	124	.		
4,8	68,5	20	230	125	161		КПР-9 АПП-1	
5,5	44,0	16	260	150	186		КПР-9 АПП-1	
8,5	42,5	18	245	156	196		КПР-9 АПП-1	
15,0	30,0		274	222	242		КПР-9 АПП-1	
17,5	23,4	20					КПР-9 АПП-1	
20,0	20,0	18	410	222	243		КПР-9 АПП-1	
27,0	18,0	15	410	213	268	Р-27ВТ	КПР-9 АПП-1	
43,0	14,6	17	516	230	320	Р-27ВТ		

Основные технические данные преобразователей

Тип преобразователя	Номинальные данные									
	Мощность. $P_{\text{ном}}, \text{ва}$	Напряжение U в		Ток I а		Пусковой ток $I, \text{а}$	Скорость n $\text{об/мин} \cdot 10^3$	Частота гц	$\cos \varphi$	к.п.д
		двигателя	генератора	двигателя	генератора					
ПАГ-1Ф	56	$27 \pm 10\%$	$36 \pm 10\%$	3,5	0,65		8,0	400	0,65	
ПТ-70Ц	70	$27 \pm 10\%$	$36^{+3}_{-1}\%$	5,2	1,12		12,0	$400^{+2}_{-3}\%$	0,6	0,3
ПТ-125Ц	125	$27 \pm 10\%$	$36^{+5}_{-1,5}\%$	8,0	2,0		12,0	$400 \pm 2\%$	0,6	0,35
ПТ-200Ц	200	$27 \pm 10\%$	$36^{+4}_{-1,5}\%$	14,0	3,2		8,0	$400 \pm 2\%$	0,6	0,317
ПТ-500Ц	500	$27 \pm 10\%$	$36 \pm 5\%$	37,0	8,0		12,0	$400 \pm 2\%$	0,8	0,4
ПТ-750Ц	750	$27 \pm 10\%$	$36 \pm 2\%$	49,4	12,0		12,0	$400 \pm 2\%$	0,8	0,45
ПТ-1000Ц	1000	$27 \pm 10\%$	$36 \pm 5\%$	60,5	16,1		12,0	$400 \pm 2\%$	0,8	0,49
ПТ-1500Ц	1500	$27 \pm 10\%$	$37 \pm 1,5\%$	87,0	24,0	680	8,0	$400 \pm 2\%$	0,8	0,51
*ПТ-3000Ц	3000	$27 \pm 10\%$	$208 \pm 3\%$	180,0	8,35		8,0	$400 \pm 2\%$	0,85	

* Продув встречным потоком воздуха 57 л/сек.

постоянного тока в трехфазный переменный

Вес G $кг$	$G/P_{\text{ном}}$ $кг/кВа$	Высота полета H $км$	Дли- на	Ши- рина	Вы- сота	Регулирующая аппаратура		
						регулятор напряже- ния	коробка переключе- ния	выносное сопротив- ление
			мм					
3,5	62,5	15	240	114	124			
4,8	68,5	20	230	125	161		КПР-9 АПП-1	
5,5	44,0	16	260	150	186		КПР-9 АПП-1	
8,5	42,5	18	245	156	196		КПР-9 АПП-1	
15,0	30,0		274	222	242		КПР-9 АПП-1	
17,5	23,4	20					КПР-9 АПП-1	
20,0	20,0	18	410	222	243		КПР-9 АПП-1	
27,0	18,0	15	410	213	268	Р-27ВТ	КПР-9 АПП-1	
43,0	14,6	17	516	230	320	Р-27ВТ		

Стабилизированное напряжение постоянного тока подается к вибратору, который на выходе дает напряжение переменного тока прямоугольной формы частотой 400 гц. Это напряжение усиливается и фильтруется. На выходе фильтра получают переменный ток синусоидальной формы напряжением $115 \pm \frac{+3}{-8}$ в с частотой 400 ± 20 гц.

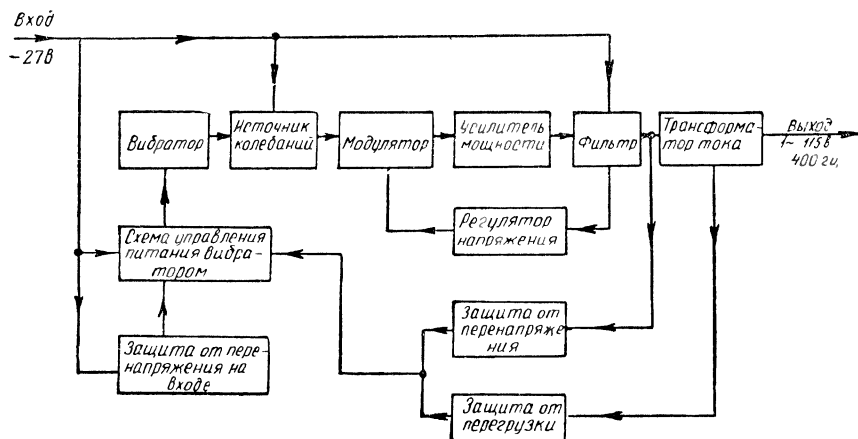


Рис. 1. 2. Блок-схема статического преобразователя

В преобразователе предусмотрены регулятор напряжения, в котором в качестве эталона напряжения используется стабилитрон; защита от перенапряжения на выходе и защита от перегрузок.

В преобразователях типа СПТ при тех же параметрах напряжения питания обеспечивается выходное напряжение 36 ± 5 в (в некоторых преобразователях прямоугольной формы вместо синусоидальной) и частота 400 ± 8 гц. Для увеличения надежности в некоторых преобразователях предусматриваются два канала: основной и резервный. При этом переключение на резервный канал производится автоматически при выходе из строя любого полупроводникового элемента основного канала.

§ 3. АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ВЫХОДНОГО НАПЯЖЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

В преобразователях типа ПО применяются синхронные генераторы, выходное напряжение которых стабилизируется автоматическими регуляторами напряжения путем изменения тока в обмотке возбуждения.

На рис. 1.3 представлена схема регулирования напряжения однофазного синхронного генератора преобразователя типа ПО с помощью угольного регулятора РУГ и магнитного усилителя МУ. Переменное сопротивление угольного регулятора r_y включено по-

храняющий свою величину и направление при всех режимах работы преобразователя. Введение обмотки смещения расширяет область использования рабочей характеристики магнитного усилителя и дает возможность увеличить н. с. для повышения его чувствительности.

Управляющая обмотка W_y подключена через выпрямитель B_3 непосредственно на регулируемое напряжение генератора и является чувствительным элементом, реагирующим на отклонение напряжения генератора от заданного. Она создает подмагничивание магнитного усилителя, пропорциональное отклонению напряжения генератора. Усиленный сигнал через выпрямитель B_1 поступает в обмотку регулятора, который, изменяя возбуждение в необходимых пределах, восстанавливает заданный уровень напряжения генератора.

Для повышения точности регулирования напряжения при сбросах и включении нагрузки имеется корректирующая обмотка W_{κ} , включенная последовательно с корректирующей обмоткой $W_{\kappa.с}$ магнитного усилителя стабилизатора скорости вращения через выпрямитель B_4 на вторичную обмотку трансформатора тока ТТ.

Для срыва автоколебаний, которые могут возникнуть при изменении режима работы преобразователя, используется стабилизирующий трансформатор ТС.

При изменении режима работы преобразователя во вторичной обмотке ТС наводится э. д. с. и возникает ток, который всегда направлен так, чтобы сгладить первоначальное изменение тока в рабочей обмотке регулятора $W_{\text{р}}$.

Регуляторы напряжения, выполненные по такой схеме, обеспечивают стабилизацию выходного напряжения преобразователей с точностью до 3% при изменении нагрузки от нуля до номинальной и отклонениях напряжения питания до $\pm 10\%$.

В преобразователях типа ПТ с синхронными магнитоэлектрическими генераторами выходное напряжение стабилизируется автоматическими регуляторами напряжения путем изменения величины магнитного сопротивления ярма статора за счет изменения тока в управляющей обмотке генератора УОГ.

На рис. 1.4 представлена схема регулирования напряжения трехфазного магнитоэлектрического генератора преобразователя типа ПТ. Управляющая обмотка генератора УОГ подключена к выходу магнитного усилителя МУ через выпрямитель B_1 .

Ток в управляющей обмотке генератора определяется индуктивным сопротивлением магнитного усилителя, которое зависит от результирующего потока подмагничивания, создаваемого токами, протекающими по обмоткам МУ: управления W_y , последовательной обратной связи $W_{o.c.1}$, параллельной обратной связи $W_{o.c.2}$ и встречно с ними включенной обмотки смещения W_{cm} .

Обмотки обратной связи служат для увеличения чувствительности магнитного усилителя и включены согласно с обмоткой управ-

ления W_y . Обмотки W_{cm} и W_y служат для целей, которые отмечались выше.

Таким образом, в ярме статора действуют два потока: постоянный, определяемый н. с. управляющей обмотки генератора, и переменный, определяемый намагничивающей силой магнитов.

При изменении тока в управляющей обмотке генератора (УОГ) изменяется магнитная проницаемость, а следовательно, и магнитное сопротивление ярма статора, что ведет к изменению величины рабочего потока машины.

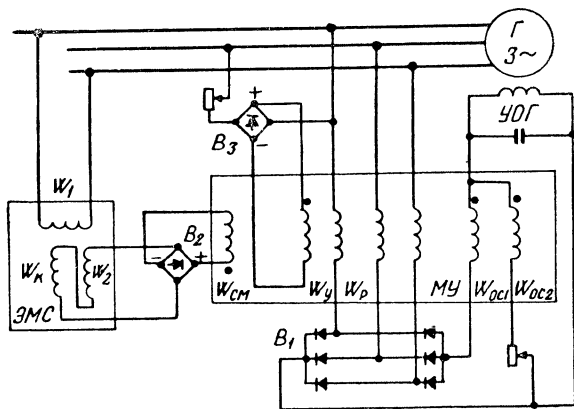


Рис. 1.4. Схема регулирования напряжения трехфазного магнитоэлектрического генератора преобразователя типа ПТ

Процесс регулирования напряжения протекает следующим образом. При изменении регулируемого напряжения изменяется ток в обмотке управления усилителя, вследствие чего изменяется результирующий поток подмагничивания сердечника усилителя и его индуктивное сопротивление. В результате ток в рабочей обмотке усилителя W_p и соответственно ток в управляющей обмотке генератора меняется так, что напряжение на его зажимах приводится к номинальному значению.

В преобразователях типа ПТ с синхронными генераторами электромагнитного возбуждения напряжение регулируется по схеме, рассмотренной для ПО. При этом элементы системы регулирования подключаются на фазное напряжение с использованием нейтрали генератора.

В некоторых регуляторах напряжения в качестве чувствительного элемента начинают применяться измерители напряжения ИН, выполненные в виде моста с нелинейным элементом в одном из плеч (см. рис. 3.6 пятого раздела).

Мост с нелинейным сопротивлением имеет более высокую чувствительность и стабильность выходного напряжения, что позволяет повысить точность регулирования напряжения преобразователя до $\pm 1\%$ и выше.

§ 4. СТАБИЛИЗАЦИЯ ЧАСТОТЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Частота переменного тока преобразователя стабилизируется автоматическим регулятором частоты путем обеспечения постоянной скорости вращения электродвигателя за счет изменения тока в его управляющей обмотке УО.

Регулятор частоты состоит из трех органов: измерительного — в виде резонансного контура LC ; усилительного — в виде угольного регулятора или магнитного усилителя и исполнительного — в виде управляющей обмотки УО электродвигателя.

Регулируется частота по замкнутому циклу, т. е. отклонение частоты от номинального значения воспринимается измерительным органом, сигнал от которого усиливается и передается на исполнительный орган, который, воздействуя на электродвигатель, возвращает частоту практически к прежнему значению.

Регуляторы частоты по принципу регулирования подразделяются на статические и астатические.

В статическом регуляторе каждому значению возмущения по нагрузке или напряжению питания соответствует свое значение частоты в установившемся режиме. В зависимости от типа статический регулятор обеспечивает стабилизацию частоты преобразователя с точностью до $\pm 0,5\%$.

Астатический регулятор при любом значении возмущения обеспечивает одно и то же значение частоты в установившемся режиме. Такие регуляторы поддерживают точность стабилизации частоты порядка $\pm 0,05\%$ и выше и применяются в преобразователях специального назначения. Примером астатического принципа регулирования может служить интегральный регулятор частоты, рассматриваемый ниже.

Измерительным органом для обнаружения отклонения частоты от номинального значения может служить резонансный контур, представленный на рис. 1.5.

Обычно контур настраивается на резонансную частоту $f_{\text{рез}} = 480\text{—}520$ гц. В этом случае при номинальной частоте $f_{\text{ном}} = 400$ гц рабочая точка A располагается на левой ветви характеристики контура.

Таким образом, при отклонении частоты преобразователя от номинальной изменяется результирующий ток контура, увеличиваясь при снижении частоты и уменьшаясь при повышении. Этот ток после усиления используется для стабилизации скорости вращения электродвигателя.

Резонансный регулятор частоты с угольным усилителем представлен на рис. 1.6. Измерителем частоты является резонансный контур LC , настроенный на резонансную частоту выше номинальной. При отклонении частоты от номинальной изменяется ток резонансного контура, который через выпрямитель

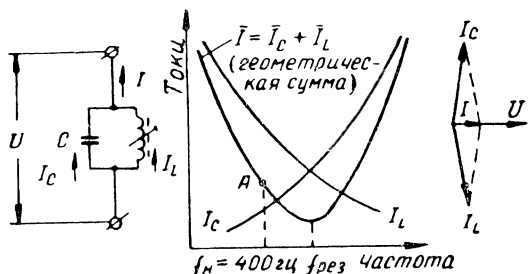


Рис. 1.5. Работа резонансного контура

поступает в обмотку электромагнита угольного регулятора. Последний, изменяя сопротивление угольного столба, изменяет ток в управляющей обмотке (УО) электродвигателя. При этом ток возбуждения электродвигателя меняется таким образом, чтобы частота приближалась к номинальной.

Угольный регулятор (в качестве усилительного органа) имеет ограниченное применение ввиду недостаточной надежности и снижения точности стабилизации частоты в процессе эксплуатации вследствие износа угольных шайб.

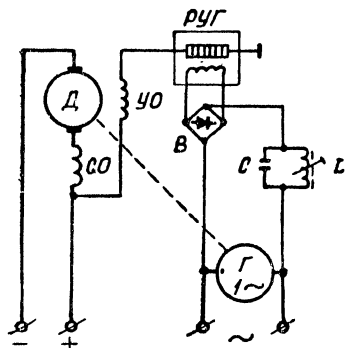


Рис. 1.6. Схема резонансного регулятора частоты с угольным усилителем

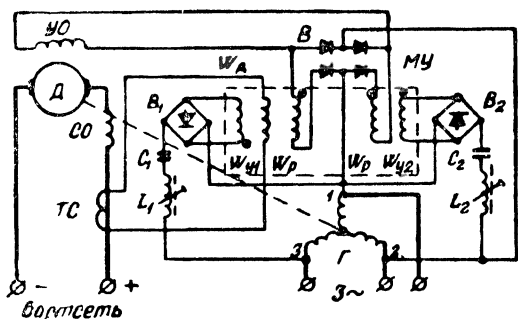


Рис. 1.7. Принципиальная схема резонансного регулятора частоты с дифференциальным магнитным усилителем

Резонансный регулятор частоты с дифференциальным магнитным усилителем представлен на рис. 1.7. Он обеспечивает точность стабилизации частоты до $\pm 1\%$. Измерительным органом частоты являются два резонансных контура

L_1C_1 и L_2C_2 , а усилительным звеном — магнитный усилитель МУ, выполняющий роль переменного индуктивного сопротивления в цепи управляющей обмотки (УО) двигателя.

Рабочие обмотки W_p магнитного усилителя включены таким образом, что по каждой из них течет пульсирующий ток, постоянная составляющая которого, подмагничивая усилитель пропорционально рабочему току нагрузки, создает положительную обратную связь.

Контур L_2C_2 , настроенный на частоту 450 гц, питает управляющую обмотку (подмагничивания) W_{y2} , магнитный поток которой направлен согласно с потоком положительной обратной связи.

Контур L_1C_1 , настроенный на частоту 350 гц, питает управляющую обмотку W_{y1} (нейтрализации), которая создает поток, направленный встречно с потоками подмагничивания и положительной обратной связи.

Повышение напряжения питающей сети или уменьшение нагрузки генератора вызывает увеличение скорости вращения электродвигателя, а следовательно, частоты переменного тока. При этом ток в обмотке подмагничивания возрастает, а в обмотке нейтрализации — убывает. Благодаря встречному включению этих обмоток, результирующий магнитный поток увеличивается, что приводит к увеличению насыщения сердечника, а следовательно, к уменьшению индуктивного сопротивления дросселя переменному току. В связи с этим, ток в управляющей обмотке электродвигателя возрастает, а скорость его падает. При уменьшении напряжения питания или увеличении нагрузки процесс регулирования протекает в обратном порядке.

При частоте 400 гц токи в обмотках подмагничивания и нейтрализации становятся равными и их магнитные потоки нейтрализуются.

Для предотвращения возникновения автоколебаний при изменении режима работы преобразователя введен трансформатор устойчивости ТС, первичная обмотка которого включена в цепь электродвигателя, а вторичная — на демпферную обмотку W_d магнитного усилителя.

Изменение режима вызывает импульс тока, который передается на демпферную обмотку МУ, и его действие всегда направлено так, что затормаживает изменение тока в управляющей обмотке двигателя, возникающее в ней от изменения тока в контурах.

В некоторых регуляторах частоты с магнитными усилителями применяются схемы с одним резонансным контуром. В таких схемах всегда имеет место значительное начальное подмагничивание магнитного усилителя, вследствие чего существенно снижаются пределы регулирования.

Интегральный регулятор частоты с астатическим принципом регулирования представлен на рис. 1.8.

В регуляторе предусмотрены два канала регулирования: грубый — с двумя резонансными контурами PK_1 и PK_2 и точный —

с кварцевым задающим генератором КЗГ и фазовым дискриминатором ФД. Оба канала включены параллельно на дифференциальный магнитный усилитель МУ, выход с которого через выпрямитель В подается на управляющую обмотку УО электродвигателя преобразователя.

Грубый канал представляет собой резонансный регулятор частоты с дифференциальным магнитным усилителем, принцип действия которого рассматривался выше.

В канале точного регулирования фазовый дискриминатор определяет угол сдвига фаз ψ между вектором напряжения эталонной частоты, выдаваемой КЗГ, и вектором напряжения регулируемого преобразователя.

Фазовый дискриминатор выдает в магнитный усилитель напряжение, пропорциональное косинусу угла сдвига фаз $U_{ф.д.} = K \cdot \cos \psi$, т. е. осуществляет интегральное управление по углу сдвига фаз. Следовательно, установившийся режим в системе возможен только при равенстве эталонной и регулируемой частот. Это значит, что преобразователь синхронизируется с источником эталонной частоты и точность стабилизации определяется исключительно точностью эталонной частоты, которая для КЗГ примерно 0,05%.

При большом отклонении частоты преобразователя от номинального значения регулирование осуществляется грубым каналом, который сужает область отклонения частоты от номинальной. В этой узкой области начинает действовать канал точного регулирования, благодаря которому повышается точность стабилизации частоты преобразователя.

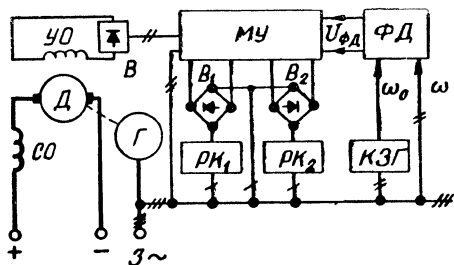


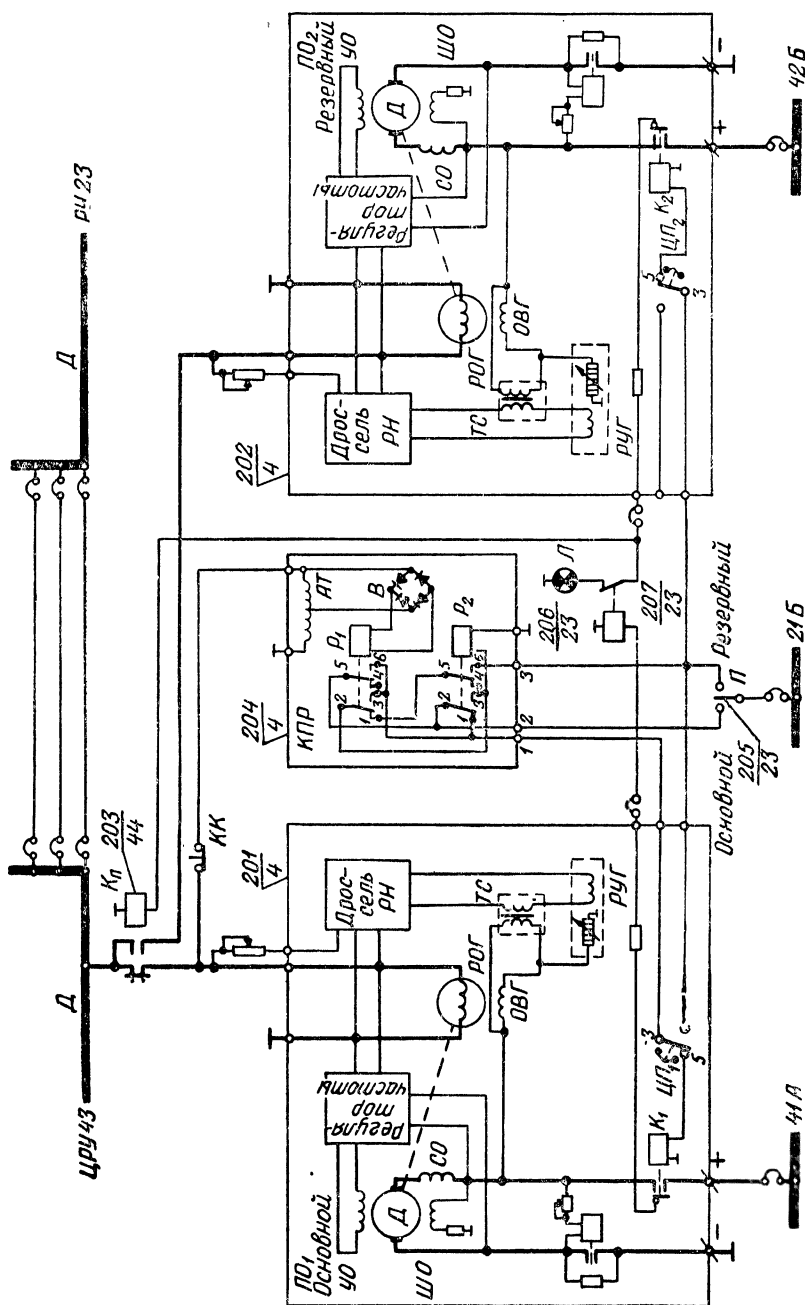
Рис. 1.8. Блок-схема интегрального регулятора частоты с источником эталонной частоты.

§ 5. ВТОРИЧНЫЕ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ ОДНОФАЗНОГО ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Во вторичных энергосистемах однофазного переменного тока широкое распространение получило централизованное (групповое) энергоснабжение потребителей.

Практическое применение получили энергосистемы с раздельной работой преобразователей на определенную группу потребителей и автоматическим включением резервного источника при отказе основного.

Энергосистема с односторонним переключением резервного преобразователя. На рис. 1.9 пред-



ставлена схема энергосистемы с двумя преобразователями, один из которых резервный, включающийся автоматически (с помощью коробки переключения КПР) в сеть при отказе основного.

Коробка переключения КПР автоматически отключает основной преобразователь и включает резервный, если напряжение переменного тока отсутствует из-за:

1. Обрыва в цепи переменного тока внутри преобразователя или во внешней цепи до переключающего контактора.

2. Короткого замыкания в генераторе или фидере, питающем шины потребителей переменного тока (до переключающего контактора);

3. Короткого замыкания или обрыва в цепи питания преобразователя постоянным током.

Введение КПР не исключает необходимости применения центробежного переключателя (ЦП) преобразователя, а лишь дополняет его защитные функции.

В некоторых аварийных случаях, например, при обрыве цепи управляющей обмотки электродвигателя, обрыве цепи переменного тока дросселя и др., срабатывает только центробежный переключатель, а затем после остановки преобразователя выключается КПР.

В других аварийных случаях: обрыв или короткое замыкание в цепи питания преобразователя постоянным током, в генераторе или фидере переменного тока срабатывает только КПР.

Возможны также аварийные случаи, когда почти одновременно срабатывают КПР и центробежный переключатель преобразователя. Это явление имеет место при обрыве цепи рабочей обмотки генератора или цепи возбуждения генератора и нарушении щеточного контакта.

Установка одной коробки КПР обеспечивает одностороннее переключение нагрузки переменного тока с основного преобразователя на резервный. Один преобразователь в этом случае работает всегда как основной, а другой остается в холодном резерве (не вращается). Для равномерного износа преобразователей при эксплуатации необходимо их периодически переставлять, при этом следует иметь в виду, что срок их службы по летным часам практически удваивается.

Схема КПР собрана на двух малогабаритных переключающих реле P_1 и P_2 . Реле P_1 реагирует на величину напряжения переменного тока, а реле P_2 — блокировочное. Реле P_1 включается в цепь переменного тока через понижающий автотрансформатор АТ и выпрямитель В, собранный по двухполупериодной мостовой схеме.

Схема одностороннего переключения работает следующим образом. При установке переключателя в положение «Основной» напряжение бортовой сети через контакты 2—1 реле P_2 и контакты 3—5 центробежного переключателя ЦП₁ подается на пусковой контак-

тор K_1 основного преобразователя ПО₁. Преобразователь запускается и через нормально-замкнутые клеммы K_n питает распределительную шину 43Д переменного тока.

При появлении напряжения на шине переменного тока срабатывает реле P_1 , которое, замыкая контакты 2—3 и 5—6, дает импульс на включение реле P_2 по цепи: плюс бортсети — контакты 5—6 и 3—2 — реле P_1 — обмотка реле P_2 .

Реле P_2 срабатывает и плюс бортсети дополнительно подается на его обмотку через собственные контакты 2—3.

После срабатывания реле P_1 и P_2 схема подготовлена к выполнению своих задач по переключению преобразователей. При этом обмотки пускового контактора K_1 основного преобразователя питаются через замкнутые контакты 5—6 реле P_1 , а цепь питания обмоток пускового контактора K_2 резервного преобразователя и контактора переключения K_n фидера переменного тока разомкнута только контактами 1—2 того же реле P_1 .

При отсутствии напряжения переменного тока реле P_1 размыкает свои контакты и тем самым отключает основной преобразователь и включает резервный по цепи: плюс бортсети — контакты 2—3 реле P_2 — контакты 1—2 реле P_1 — контакты 5—6 реле P_2 — контакты 3—5 центробежного переключателя ЦП₂ резервного преобразователя.

Сигнальная лампа Л, указывающая работу резервного преобразователя, загорается.

Для защиты возможно большего участка фидера переменного тока от обрывов и коротких замыканий точку включения провода, питающего КПР переменным током, необходимо располагать непосредственно у распределительной шины.

При отказе системы автоматики имеется возможность включить резервный преобразователь вручную. Для этого переключатель П необходимо установить в положение «Резервный». Для проверки защитного действия коробки КПР в эксплуатации предусматривается кнопка проверки КК, которая должна быть нормально замкнута.

Для автоматического переключения преобразователей вместо релейных коробок переключения типа КПР могут применяться коробки переключения типа КПП с полупроводниковыми элементами.

Энергосистема с двусторонним переключением преобразователей, изображенная на рис. 1.10, имеет две коробки переключения КПР.

Любой из двух установленных преобразователей может быть запущен и включен на работу, при этом другой выполняет роль холодного резервного источника. Схема двустороннего переключения позволяет равномернее эксплуатировать установленные на самолете преобразователи, попеременно включая в качестве основного один из двух преобразователей.

Две автономные энергосистемы с одним резервным преобразователем представлены на рис. 1.11. В схеме три преобразователя и две коробки переключения КПР.

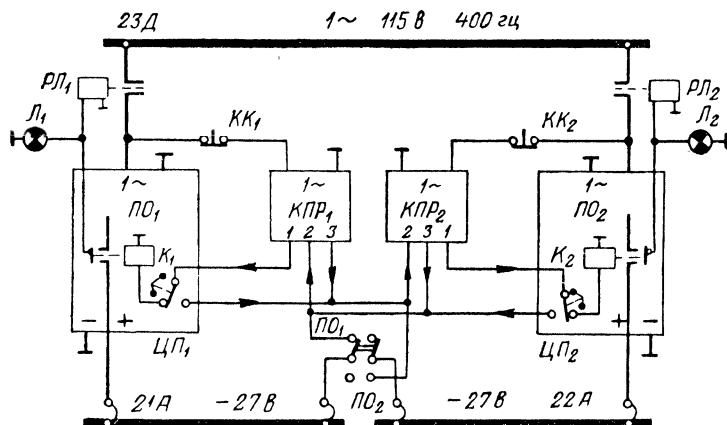


Рис. 1.10. Схема энергосистемы с двусторонним переключением преобразователей

Два преобразователя основные (нормально работающие), а третий находится в холодном резерве (не вращается). Каждый из основных преобразователей работает на свою отдельную шину

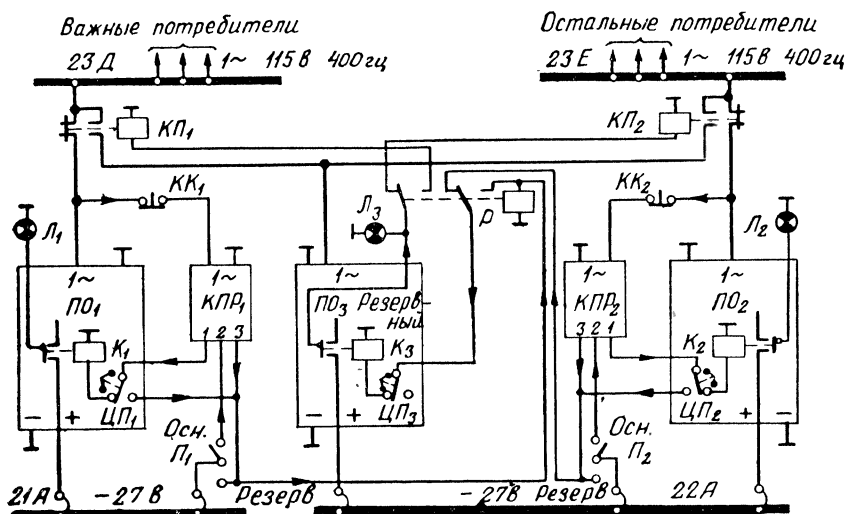


Рис. 1.11. Схема двух автономных энергосистем с одним резервным преобразователем

переменного тока. На шине 23Д включены наиболее важные потребители переменного тока, а на шине 23Е — менее ответственные потребители.

Схема выполняет следующие защитные функции:

1. При выходе из строя какого-либо основного преобразователя (ПО₁ или ПО₂) он отключается от соответствующей шины, а на его место включается резервный преобразователь ПО₃.

2. Если сначала из строя выйдет основной преобразователь ПО₁ и на его шины включится резервный преобразователь ПО₃, а затем из строя выйдет основной преобразователь ПО₂, то последний отключится от своей шины 23Е и шина с менее ответственными потребителями останется обесточенной.

3. Если сначала выйдет из строя основной преобразователь ПО₂ и на его шину включится резервный преобразователь ПО₃, а затем выйдет из строя основной преобразователь ПО₁, то последний отключится от своей шины 23Д, а резервный преобразователь переключается с шины 23Е на 23Д, обеспечивая питанием наиболее важные потребители.

Помимо автоматического включения резервного преобразователя, предусмотрено его ручное включение установкой переключателя П₁ и П₂ в положение «Резервный».

Работа каждого основного преобразователя сигнализируется горящими лампочками Л₁ и Л₂. При включении резервного преобразователя на те или иные шины загорается лампочка Л₃.

§ 6. ВТОРИЧНЫЕ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ ТРЕХФАЗНОГО ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Вторичные энергосистемы трехфазного переменного тока обычно небольшой мощности порядка 0,5÷3,0 *кВа*, напряжением $36 \text{ в} \pm 3\%$ и частотой $400 \text{ гц} \pm 2\%$ обеспечивают питанием маломощные, но ответственные потребители, включая пилотажно-навигационные системы управления и контроля полетом.

Параллельная работа преобразователей не нашла практического применения, так как к ней предъявляются такие же требования, как и к параллельной работе синхронных генераторов, а это связано с усложнением системы, увеличением веса и снижением надежности.

Параллельная работа преобразователей усложняется тем, что они должны поддерживать заданный уровень напряжения и частоты сети переменного тока при колебаниях напряжения сети постоянного тока на $\pm 10\%$ от номинала, изменении нагрузки от нуля до номинала и изменении температуры окружающей среды в широком диапазоне.

Практическое применение нашли энергосистемы трехфазного переменного тока с раздельной работой преобразователей на определенную группу потребителей и автоматическим включением резервного источника при отказе основного.

Принципы построения схемы вторичных энергетических систем трехфазного переменного тока с преобразователями аналогичны схемам вторичных энергетических систем однофазного переменного тока, поэтому для примера рассмотрим только некоторые из них.

Энергосистема с односторонним переключением резервного преобразователя. В энергосистему, схема которой приведена на рис. 1.12, входят: два трехфазных преобразователя, из которых один — основной, а второй — резервный; коробка переключения КПР; переключатель П, контактор переключения K_p , лампа сигнализации Л, распределительное устройство РУ26 с шинами и защитой потребителей.

Коробка переключения КПР предназначена для целей, которые отмечались в § 5.

При установке переключателя в положение «Основной» минус подается по цепи: клемма 5 — клеммы 5—4 реле P_4 — клемма 8 и обмотка контактора K_1 основного преобразователя ПТ₁. Преобразователь запускается и подает переменный ток в сеть. Напряжения переменного тока поступает в КПР через клеммы 1, 2, 3. Срабатывают реле P_1 , P_2 , P_3 , P_4 . Реле P_4 самоблокируется. Схема готовится к выполнению задач по переключению преобразователей.

При отсутствии напряжения переменного тока реле P_1 размыкает свой контакт, что приводит к отпусканию реле P_2 и P_3 , а реле P_4 находится в сработавшем состоянии, так как оно самоблокировано. Минус от переключателя П пойдет по цепи: клемма 5 КПР — контакты 8—7 реле P_3 — контакты 3—2 реле P_4 — клемма 7 КПР — клемма 5 и обмотка K_2 резервного преобразователя ПТ₂. Резервный преобразователь запускается и подключается к распределительной шине контактором переключения K_p , который получает минус одновременно с K_2 . При этом загорается сигнальная лампа Л «Работа резервного преобразователя».

Для выявления нарушения соотношений напряжений в фазах переменного тока в КПР имеется фильтр, состоящий из R_4 ; R_3 ; C_1 ; R_1 ; C_2 . При правильном соотношении напряжений фаз через выпрямитель B_1 в обмотку 1—2 магнитного усилителя ток не подается, а при нарушении — подается.

Обмотки 1—2 и 3—4 магнитного усилителя включены встречно, следовательно, при протекании тока по обмотке 1—2 магнитный поток подмагничивания уменьшается, а индуктивное сопротивление возрастает, что приводит к снижению тока, протекающего через обмотку реле P_1 . Реле P_1 отпускает и схема срабатывает, как отмечено выше, отключая основной преобразователь и включая резервный.

При отказе системы автоматического переключения предусмотрена возможность включения резервного преобразователя вручную установкой переключателя П в положение «Резервный».

Для автоматического переключения преобразователей вместо релейных коробок переключения типа КПР могут применяться ко-

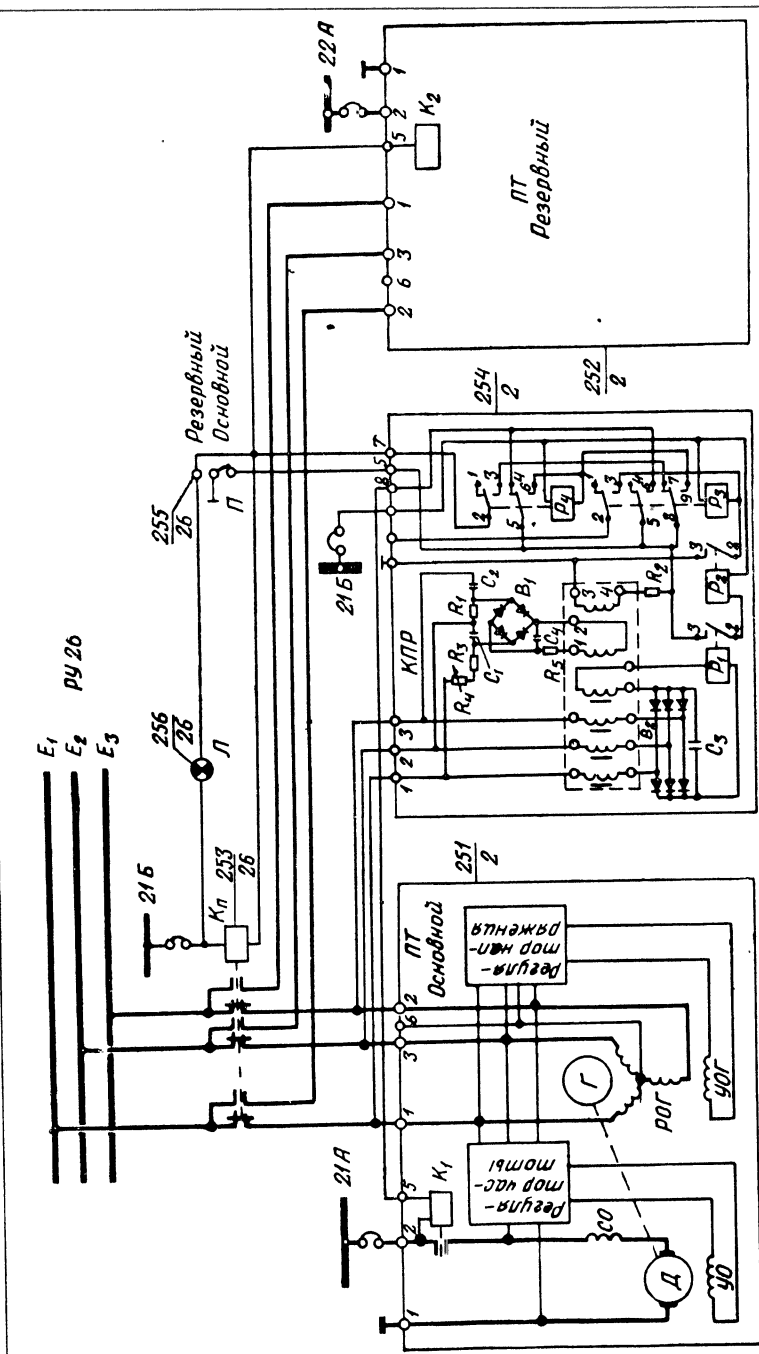


Рис. 1.12. Принципиальная схема вторичной энергосистемы трехфазного переменного тока с резервированием преобразователя

робки переключения типа КПП с полупроводниковыми элементами.

Две автономных энергосистемы с одним резервным преобразователем. На рис. 1.13 представлена схема, в которой три трехфазных преобразователя и две коробки переключения КПР. Два преобразователя являются основными (нормально работающими), а третий находится в холодном резерве (не вращается). Каждый из основных преобразователей рабо-

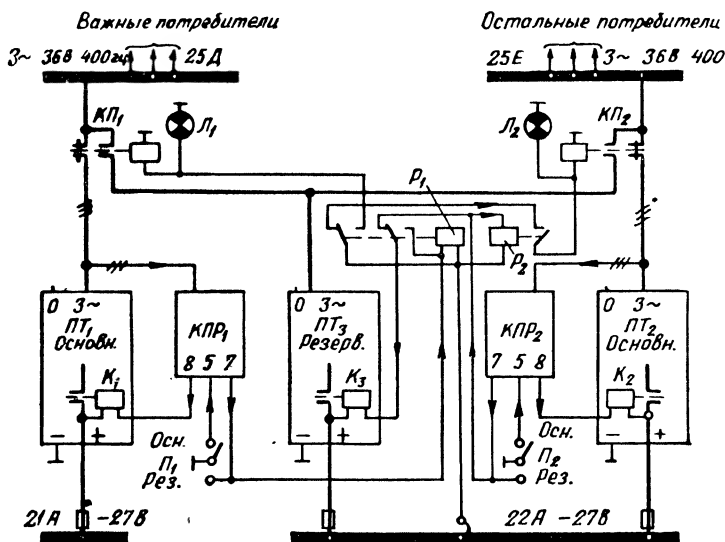


Рис. 1.13. Схема двух автономных энергосистем с одним резервным преобразователем

тает на свою отдельную шину переменного тока. На шине 25Д включены наиболее важные потребители переменного тока, а на шине 25Е — менее ответственные потребители.

Схема выполняет следующие защитные функции:

1. При выходе из строя какого-либо основного преобразователя (ПТ₁ или ПТ₂) он отключается от соответствующей шины, а на его место включится резервный преобразователь ПТ₃.

2. Если сначала из строя выйдет основной преобразователь ПТ₁ и на его шины включается резервный преобразователь ПТ₃, а затем выйдет из строя основной преобразователь ПТ₂, то последний отключается от своей шины 25Е и шипа с менее ответственными потребителями останется обесточенной.

3. Если сначала из строя выйдет основной преобразователь ПТ₂ и на его шину включится резервный преобразователь ПТ₃, а затем из строя выйдет основной преобразователь ПТ₁, то последний отключится от своей шины 25Д, а резервный — переключается

с шины 25Е на 25Д, обеспечивая питанием наиболее важные потребители.

Помимо автоматического включения резервного преобразователя, предусмотрено ручное включение его установкой переключателей Π_1 и Π_2 в положение «Резервный».

Когда взамен основного преобразователя работает резервный, то загораются лампы L_1 или L_2 .

Глава II

ВТОРИЧНЫЕ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

§ 1. РОЛЬ ВТОРИЧНОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

На летательных аппаратах с первичной энергосистемой трехфазного переменного тока напряжением 200/115 в неизбежна вторичная энергосистема постоянного тока напряжением 27 в.

Постоянный ток необходим для питания: радиосвязной, радиолокационной и навигационно-пилотажной аппаратуры, электромагнитных реле, электрокранов, цепей управления, защиты и сигнализации. Постоянный ток вторичной энергосистемы также необходим для подзарядки аккумуляторных батарей, используемых в качестве аварийного источника питания.

Мощность потребителей постоянного тока не превышает 5—10% от общей потребляемой мощности переменного тока. Однако их количество весьма велико и они играют существенную роль в надежности различных систем.

В качестве источников энергии во вторичных энергосистемах постоянного тока могут применяться электромашинные или статические преобразователи переменного тока в постоянный. Практическое распространение получили статические преобразователи в виде трансформаторно-выпрямительных блоков (ТВБ), которые по сравнению с электромашинными обладают рядом существенных преимуществ: отсутствием вращающихся и подвижных частей, безыскровой коммутацией тока, бесшумностью работы, меньшим относительным весом ($кг/квт$), повышенным коэффициентом полезного действия и надежностью, особенно в высотных условиях.

Во вторичных энергосистемах постоянного тока возможны три вида включения ТВБ: раздельное на соответствующую группу потребителей, параллельное на сосредоточенную нагрузку и параллельное на разнесенную нагрузку.

При использовании генераторов переменного тока нестабилизированной частоты в качестве основных первичных источников энергии могут применяться выпрямительные устройства для создания энергосистемы постоянного тока, используемой в качестве основной системы энергоснабжения летательного аппарата.

§ 2. СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ ВЕНТИЛЕЙ ПРИ ВЫПРЯМЛЕНИИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

На рис. 2.1 представлены наиболее распространенные схемы включения вентилей при выпрямлении однофазного и трехфазного переменного тока. В различных вариантах схем предусматривается одно- и двухполупериодное выпрямление.

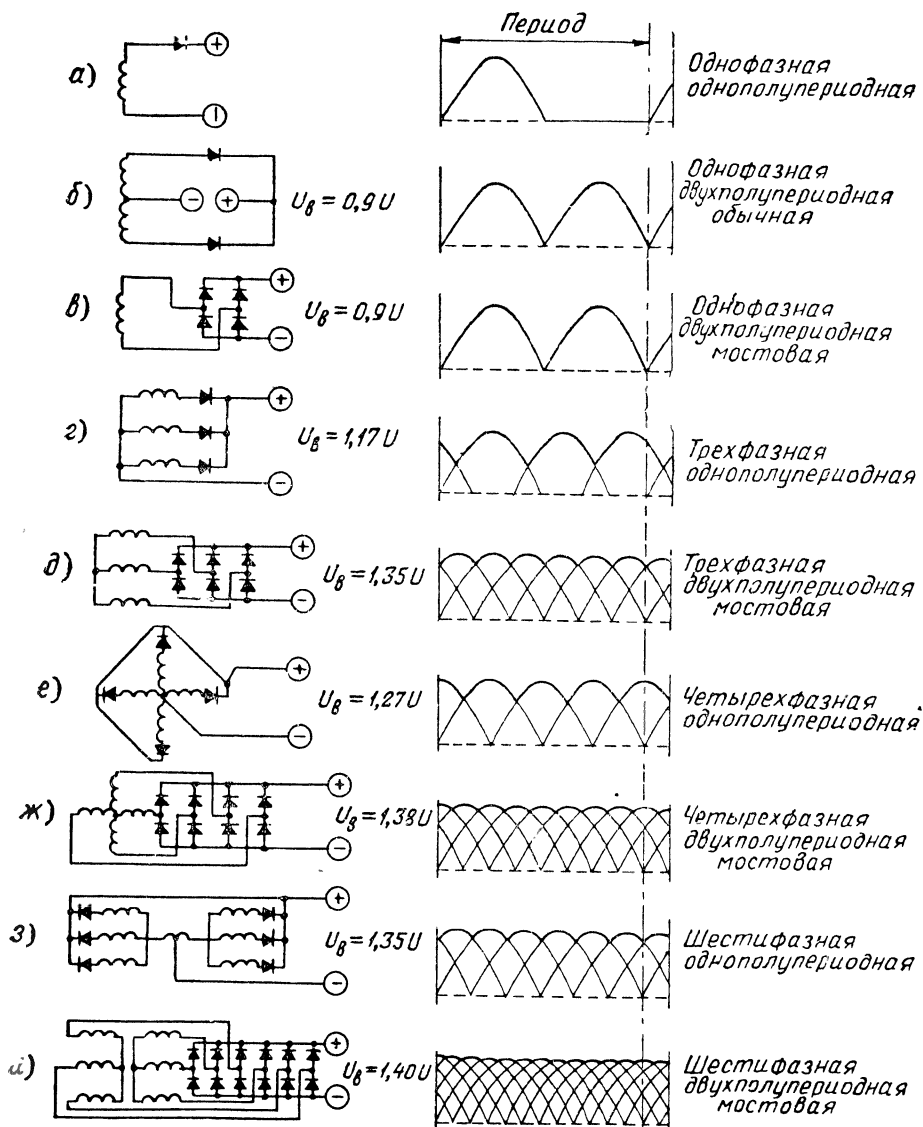


Рис. 2.1. Схемы включения вентилей при выпрямлении переменного тока

Однополупериодные схемы выпрямления (особенно однофазные) применяются редко из-за плохого использования трансформатора и больших пульсаций выпрямленного тока, для сглаживания которых необходимы громоздкие фильтры.

При обычной двухполупериодной схеме выпрямления однофазного тока (схема б) трансформатор должен состоять из двух вторичных обмоток, соединенных последовательно и имеющих общий вывод.

Для трехфазного выпрямителя по обычной схеме (схема з) необходим трансформатор с шестифазной вторичной обмоткой и с выведенной средней точкой, при этом возможна только одна схема соединения вторичных обмоток — звездой.

Однофазная мостовая схема (схема в) требует только одну вторичную обмотку трансформатора, при этом общее напряжение вторичной обмотки равно половине общего напряжения вторичных обмоток обычной двухполупериодной схемы, что приводит к снижению веса трансформатора.

Аналогичными свойствами обладает трехфазная мостовая схема, в которой имеет место высокое использование трансформатора и вентиляей, отсутствие вынужденного намагничивающего сердечник тока, малые пульсации выпрямленного тока и использование трансформатора с обычным соединением вторичных обмоток — звездой или треугольником.

Таким образом, по сравнению с обычными схемами включения вентиляей мостовые схемы отличаются низким обратным напряжением и допускают применение обычных трансформаторов. Однако они имеют двойной комплект вентиляей, хотя и меньшей мощности.

Среднее значение выпрямленного напряжения U_v , как известно, выражается следующей формулой:

$$U_v = \frac{\sqrt{2}}{\pi} m \sin \frac{\pi}{m} U,$$

где m — число выпрямленных полувольт одного периода;

U — эффективное значение приложенного переменного напряжения.

В зависимости от схемы включения трансформаторов и вентиляей, как показано на рис. 2.1, изменяется число выпрямленных полувольт одного периода и соответственно величина выпрямленного напряжения.

Для получения той или иной схемы выпрямления с определенными параметрами полупроводниковые вентиля собираются в выпрямительные столбики. В мостовой схеме число последовательно

включенных вентилях n в одном плече схемы находят из равенства

$$n = \frac{U_{\text{л}} \sqrt{2}}{U_{\text{об}}},$$

где $U_{\text{л}}$ — эффективное значение линейного напряжения трансформатора на холостом ходу;

$U_{\text{об}}$ — допустимое обратное напряжение на один выпрямитель.

Если для заданной нагрузки одного элемента недостаточно, то параллельно включают два или более элементов. Число параллельных ветвей m находят из равенства

$$m = \frac{I}{i},$$

где I — заданный ток нагрузки;

i — выпрямленный ток на один элемент в плече для выбранной схемы включения.

Параллельное включение элементов допускается, если разница в величинах падения напряжения в прямом направлении не выходит за пределы 0,2 в. При последовательном соединении элементов допускается разница в обратных напряжениях не более 2—3 в.

Коэффициент полезного действия выпрямителей зависит от качества самого выпрямителя, определяемого коэффициентом выпрямления, от схемы соединения, величины и характера нагрузки.

Теоретический к. п. д. определяется как отношение мощности постоянной составляющей выпрямленного тока к мощности его эффективного значения. При этом считается, что сопротивление выпрямителя в прямом направлении равно нулю, а в обратной бесконечности. К. п. д. твердых выпрямителей при различных нагрузках вычисляется следующей формулой:

$$\eta = \frac{P}{P + \Delta P_{\text{пр}} + \Delta P_{\text{об}}},$$

где P — полезная мощность выпрямленного тока;

$\Delta P_{\text{пр}}$ — потери в выпрямителе в прямом направлении;

$\Delta P_{\text{об}}$ — потери в выпрямителе в обратном направлении.

Среднее значение потерь за один период

$$\Delta P = \Delta P_{\text{пр}} + \Delta P_{\text{об}} = \frac{1}{T} \left[\int_0^T i_{\text{пр}} U_{\text{пр}} dt + \int_0^T i_{\text{об}} U_{\text{об}} dt \right],$$

где $i_{\text{пр}}$; $U_{\text{пр}}$; $i_{\text{об}}$; $U_{\text{об}}$ — мгновенные значения прямых и обратных токов и напряжений.

Схемы включения трансформаторов и вентилях оказывают влияние на величину, форму и частоту пульсаций выпрямленного напряжения.

Пульсации, действуя на радиосвязное оборудование, вызывают помехи. Важное значение имеет форма волны и частота пульсаций. Частота выше 20 000 *гц*, имеющая синусоидальную форму волны, не вызывает звуковых помех.

Величина пульсации при любой частоте не должна превышать 10% от номинального напряжения.

Для генераторов постоянного тока частота пульсаций является функцией количества коллекторных пластин и скорости вращения. Эта частота, как правило, выше звукового диапазона.

Основная пульсация частоты генераторов переменного тока состоит из двух циклов в каждой из трех фаз, т. е. шесть импульсов за цикл, повторяющихся 400 раз в секунду. Полная частота составит 2400 импульсов в секунду.

Пульсации в выпрямителях, особенно при применении кремниевых и германиевых диодов, не образуют синусоидальной формы, а состоят из ряда гармоник. Частота пульсаций этих гармоник находится в пределах звукового диапазона.

Амплитуда пульсаций может быть снижена, а частота удвоена при помощи шестифазных трансформаторов, имеющих по две трехфазных вторичных обмотки, которые могут быть приспособлены для одно- или двухполупериодного выпрямления (схемы *з* и *и*).

Если они предназначены для однополупериодного выпрямления, то вторичные трехфазные обмотки, соединенные в звезду, имеют между собою обратную связь через уравнивательный реактор. В этом случае частота пульсаций будет такой же, как при трехфазном выпрямлении полной волны (схема *з*).

В двухполупериодном выпрямителе для выпрямления полной волны вторичные обмотки трехфазных трансформаторов соединяются так, чтобы получить сдвиг линейных напряжений на 30°, при этом частота пульсаций удваивается по сравнению с трехфазным выпрямлением полной волны (схема *и*).

Аккумуляторная батарея, работающая параллельно с выпрямителями, сглаживает пульсации напряжения. Можно сглаживать пульсации и конденсаторами, однако это приведет к некоторому увеличению веса, поэтому предпочитают использовать комбинации трансформаторов и выпрямителей, которые дают меньшую амплитуду и большую частоту пульсаций.

§ 3. СХЕМЫ ТРАНСФОРМАТОРНО-ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫХ БЛОКОВ (ТВБ)

Трансформаторно-выпрямительный блок обычно содержит трансформатор, преобразующий напряжение первичной энергосистемы (при этом одновременно может преобразовываться число фаз и выводиться нулевая точка), электрические вентили, в качестве которых применяются кремниевые диоды, и вспомогательные устройства для регулирования напряжения, охлаждения, защиты от перегрева и сигнализации.

Трансформаторно-выпрямительные блоки трехфазного переменного тока в зависимости от схемы соединений трансформаторов и вентиляей можно подразделить на четыре основных типа:

1. Трехфазный однополупериодный.
2. Трехфазный двухполупериодный.
3. Шестифазный однополупериодный.
4. Шестифазный двухполупериодный.

Первичные обмотки трансформаторов, входящих в состав таких выпрямителей, соединяются в звезду или треугольник в зависимости от величины питающего напряжения и желательной группировки начальных фаз гармоник, появляющихся как на стороне выпрямленного напряжения, так и в кривых первичных токов. Число вторичных фаз трансформатора выбирается кратным числу первичных фаз. При равном числе фаз получаем трехфазное выпрямление трехфазного тока, при двойном числе вторичных фаз получаем шестифазное выпрямление трехфазного тока. Вторичные обмотки соединяются таким образом, чтобы сдвиг векторов напряжения основных гармоник был 60° , при этом образуется шестифазная система.

Критерием для выбора числа вторичных фаз служат:

1. Стремление получить минимальные пульсации (волнистость) в кривой выпрямленного напряжения с тем, чтобы вовсе исключить необходимость применения сглаживающего фильтра или упростить его.
2. Стремление получить минимальное число и величину гармонических в цепи переменного тока с тем, чтобы предупредить избыточный нагрев генераторов переменного тока и появление резонансных явлений в линии переменного тока, питающей выпрямительные блоки.
3. Обеспечение высокого уровня использования обмоток трансформатора по мощности, отдаваемой ими в цепь выпрямленного тока.

В трехфазных и шестифазных схемах соединения трансформаторов возможно однополупериодное или двухполупериодное выпрямление.

Двухполупериодная схема выпрямления увеличивает частоту пульсаций в два раза, так как в каждой фазе (за счет мостовой схемы соединения вентиляей) за один период выпрямляется полная волна, при этом снижается амплитуда пульсаций. Увеличение частоты пульсаций и снижение амплитуды повышает качество выпрямленного тока, уменьшает размеры сглаживающих фильтров и помехи радиооборудованию.

Двухполупериодная схема выпрямления обеспечивает более полное использование железа и обмоток трансформатора, так как при одной и той же выходной мощности по обмоткам вторичной цепи трансформатора течет ток с меньшей амплитудой в течение

двух полувольт вместо одной, что приводит к снижению веса трансформаторов.

При нормальной работе трансформаторно-выпрямительные блоки рассчитываются на изменение частоты на входе в диапазоне 380—420 гц. В аварийных случаях при повреждении регулятора частоты блоки должны допускать изменение частоты на входе в диапазоне 360—800 гц. При изменении входного напряжения в пределах $200 \text{ в} \pm \frac{2}{3} \%$ и изменении нагрузки от 10% до номинальной точность стабилизации выходного напряжения должна быть не хуже $28 \text{ в} \pm \frac{5}{9} \%$. Блоки должны обеспечивать кратковременную перегрузку ($1,5 I_{\text{ном}}$) в течение каждых 15 мин при работе с номинальной нагрузкой, к. п. д. 0,8—0,85; $\cos \varphi = 0,95 \div 0,98$. Относительный вес в зависимости от схемы соединений трансформаторов и вентилях колеблется от 1,4 до 2,5 кг/квт.

Для снятия большей мощности предусматривается обдув вентилях и трансформаторов с помощью вентиляторов или воздухом из системы кондиционирования.

Предусматривается сигнализация о перегреве с помощью термовыключателей, срабатывающих при температурах: 120—150° С — у вентиля и около 200° С — у трансформатора. Термовыключатели используются для выдачи предупреждающего сигнала или автоматического отключения ТВБ.

Для включения ТВБ при изменении входного напряжения в небольшом диапазоне имеется несколько ступеней переключения количества витков первичной обмотки трансформатора, причем это переключение может осуществляться автоматически. На выходе ТВБ включается шунт для амперметра.

Остановимся на некоторых особенностях трансформаторно-выпрямительных блоков с определенными схемами соединений трансформаторов и вентилях, получивших наибольшее распространение во вторичных энергосистемах постоянного тока.

Трехфазный однополупериодный выпрямитель λ/λ представлен на рис. 2.2. Выпрямленный ток имеет 1200 пульсаций в секунду со значительной амплитудой переменной составляющей, так как в каждой фазе за период происходит выпрямление только одной полувольты. Качество выпрямленного тока относительно низкое, а для сглаживания пульсаций и уменьшения помех необходимы тяжелые фильтры.

Трехфазный двухполупериодный выпрямитель λ/λ представлен на рис. 2.3. В двухполупериодной схеме с одной вторичной обмоткой трансформатора выпрямленный ток имеет 2400 пульсаций в секунду вследствие выпрямления полной волны, т. е. схема эквивалентна шестифазной системе. Вследствие увеличения частоты пульсаций и уменьшения их амплитуды качество выпрямленного тока выше, чем у аналогичной однополупериодной схемы. Сглаживающие фильтры имеют меньшие размеры, вес и помехи радиооборудованию.

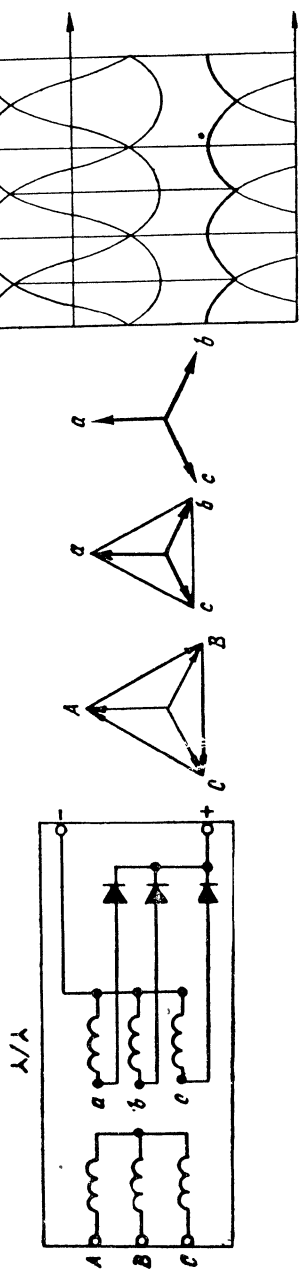


Рис. 2.2. Схема трехфазного однополупериодного ТВБ с трансформатором λ/λ

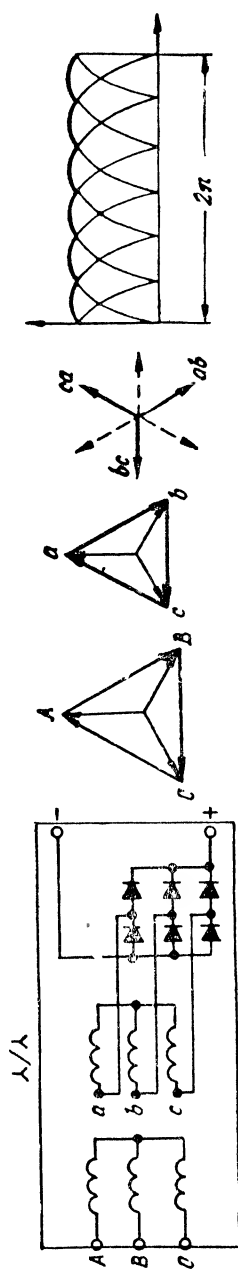


Рис. 2.3. Схема трехфазного двухполупериодного ТВБ с трансформатором λ/λ

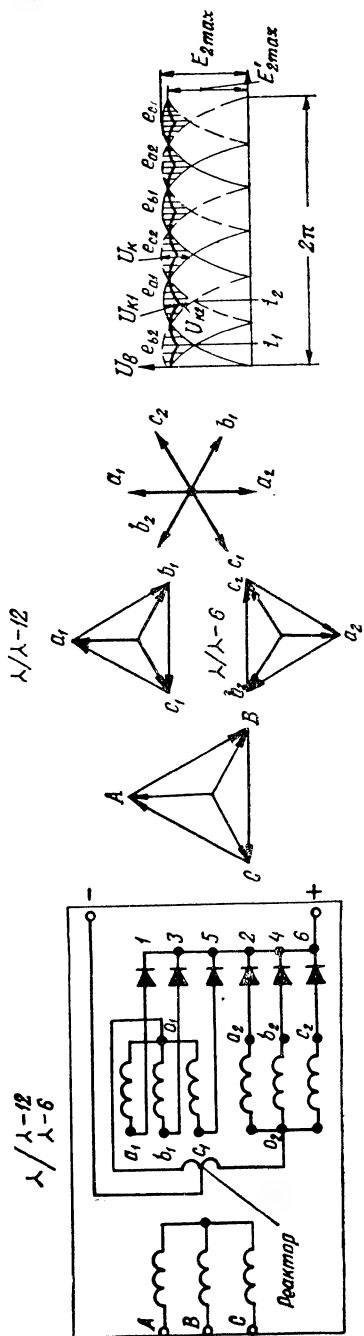


Рис. 2.4. Схема шестифазного однополупериодного ТВБ с трансформатором $\lambda/\lambda-12$ и уравнительным реактором $\lambda/\lambda-6$

Схема обеспечивает более полное использование железа и обмоток трансформатора.

Шестифазный однополупериодный выпрямитель $\lambda/\lambda-12$ с, уравнительным реактором $\lambda/\lambda-6$ представлен на рис. 2.4.

Обычная шестифазная схема однополупериодного выпрямителя с нулевым выводом обладает низким уровнем использования железа и обмоток трансформатора, так как время протекания тока через обмотку и диод составляет $1/6$ периода. Кроме того, относительно ухудшается коммутация тока. Включение уравнительного реактора в шестифазную схему с нулевым выводом увеличивает время протекания тока через диод в два раза, т. е. диод и обмотки работают $1/3$ периода — в два раза больше, чем в шестифазной схеме без реактора, что в свою очередь улучшает коммутацию тока.

Уравнительный реактор со средним выводом включен между нулевыми точками звезд O_1 и O_2 и выполняет функцию отрицательного полюса нагрузочной цепи; положительным полюсом служат вентили. Сплошными линиями нанесены фазовые напряжения одной звезды, а пунктирными — фазовые напряжения другой звезды. Разницу мгновенных значений фазовых напряжений в процессе их чередования характеризуют ординаты заштрихованных площадок. Эта разница напряжений действует в двух последовательно соединенных секциях реактора, если хотя бы по одной из них проходит требующийся для этого намагничивающий ток. Благодаря тому, что реактор имеет замкнутый стальной сердечник, ве-

личина намагничивающего тока в нем очень мала; достаточно току в одной из вторичных цепей, проходящему одновременно и через секцию уравнильного реактора, возрасти на небольшую величину (порядка 1% от номинального), чтобы реактор уже давал напряжение U_{κ} , равное ординатам заштрихованных площадок.

Благодаря наличию в уравнильном реакторе двух секций, в которых наводятся равные по величине напряжения

$$U_{\kappa 1} = U_{\kappa 2} = \frac{1}{2} U_{\kappa},$$

но имеющие разные знаки по отношению к среднему выводу, анодные напряжения в пределах одной звезды уменьшаются на $U_{\kappa 1}$, а в пределах другой звезды — возрастают на $U_{\kappa 2}$. В результате анодные напряжения во вторичных цепях, имеющих в данную часть периода наиболее высокие значения фазовых напряжений, выравниваются, что и приводит к параллельной работе таких цепей.

В интервале времени $t_1 - t_2$, представляющем собой 1/6 часть периода, выравнивается напряжение в анодных цепях, содержащих обмотки $a_1 b_2$, в связи с чем через эти обмотки и вентили 1 и 4 проходят токи, равные каждый половине выпрямленного тока. В следующий интервал времени, равный также 1/6 части периода, выравниваются напряжения в анодных цепях, в которые входят обмотки a_1 и c_2 . Такой процесс выравнивания напряжений и смены анодных токов имеет место и в других анодных цепях. При этом анодные токи в каждой из звезд меняются через каждую треть периода, когда напряжение в очередной фазе становится выше, чем в предыдущей. Анодные токи по отношению к обсам трехфазным системам меняются каждую шестую часть периода.

Кривая выпрямленного напряжения, определяемая жирной линией, проходящей посредине между анодными фазовыми напряжениями, участвующими в одновременном проведении тока, состоит из участков (вершущек) синусоид с шестикратным периодом повторяемости. Средняя величина этого напряжения меньше, чем у шестифазной схемы, работающей без уравнильного реактора.

Длительность анодных токов при таком чередовании их переходов равна $2\pi/3$, а амплитуда анодных токов равна $1/2$. Оба эти фактора: увеличение длительности и уменьшение анодного тока, являются благоприятными, так как они приводят к значительному увеличению нагрузочной способности вентиля и обмоток.

Шестифазный двухполупериодный выпрямитель $\Lambda / \Lambda - 12$, показанный на рис. 2.5, имеет выпрямленный ток $\Lambda - 6$ с 2400 пульсациями в секунду, т. е. соответствующий выпрямленному току трехфазного двухполупериодного выпрямителя.

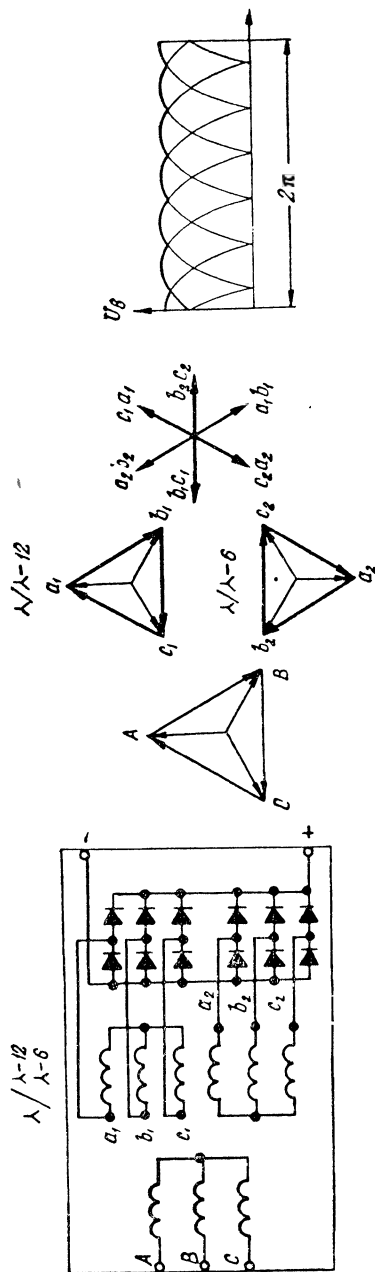


Рис. 2.5 Схема шестифазного двухподперечного ТВБ с трансформатором $\lambda/\lambda-12$ и $\lambda/\lambda-6$

Шестифазные двухполупериодные выпрямители $\lambda/\lambda-12$ и $\lambda/\lambda-12$, представленные на рис. 2.6 и 2.7, выдают выпрямленный ток с 4800 пульсациями в секунду, т. е. имеют режим, эквивалентный двенадцатифазному выпрямителю. Этот режим достигается благодаря выпрямлению полной волны и сдвигу линейных напряжений вторичных трансформаторов на 30° .

Вследствие увеличения частоты пульсаций и уменьшения их амплитуды возрастает качество выпрямленного тока и снижаются размеры и вес сглаживающих фильтров. Схема обеспечивает наиболее полное использование железа и обмоток трансформаторов, в результате чего снижаются их габариты и вес.

На рис. 2.7 показаны возможные схемы переключения витков первичной обмотки трансформатора, включения вентиляторов, фильтров, контроля тока, сигнализации перегрева вентиля и трансформаторов. Показанные схемы могут применяться в любом трансформаторно-выпрямительном блоке полностью или частично.

Из анализа рассмотренных схем ТВБ следует, что повышение качества выпрямленного тока и снижение веса при прочих равных условиях может быть достигнуто с помощью наиболее перспективных схем, представленных на рис. 2.4, 2.6 и 2.7.

Рассмотрим основные параметры некоторых трансформаторно-выпрямительных блоков.

Трансформаторно-выпрямительный блок ТВБ-2,5 (мощность 2,5 кВт) выполнен по схеме $\lambda/\Delta-11$. Номинальная на-

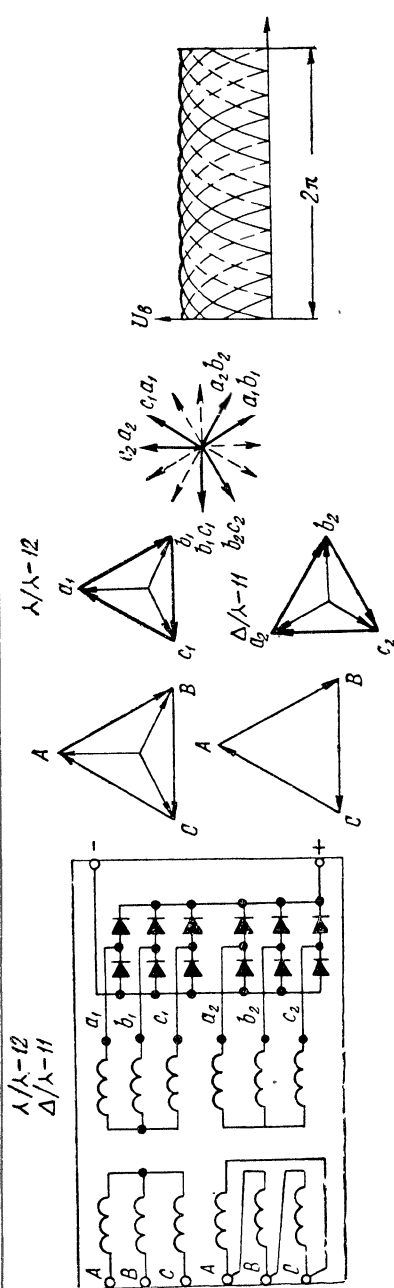


Рис. 2. 6. Схема шестифазного двухполупериодного ТВБ с трансформатором $\lambda/\lambda-12$; $\Delta/\lambda-11$

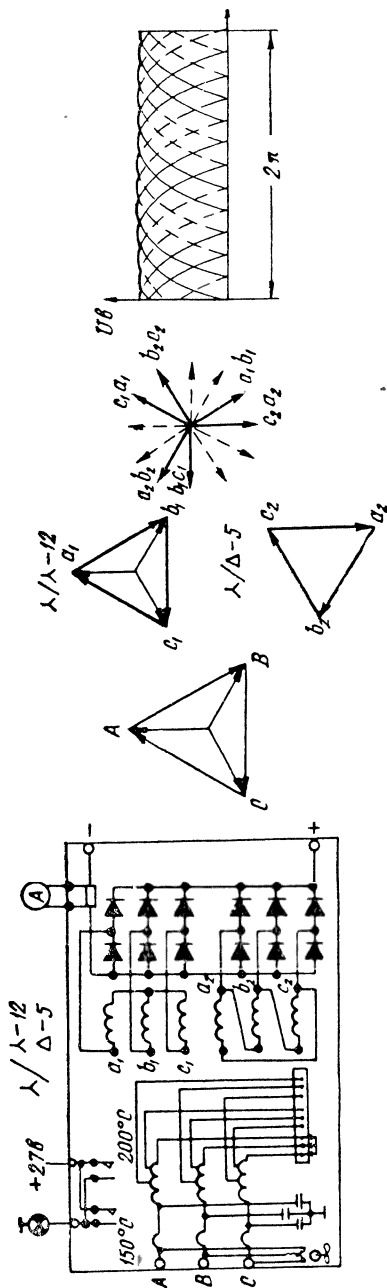


Рис. 2. 7. Схема шестифазного двухполупериодного ТВБ с трансформатором $\lambda/\lambda-12$; $\lambda/\Delta-5$

грузка блока 100 а. Блок состоит из трансформатора с первичной обмоткой, соединенной в звезду, и двумя вторичными обмотками, которые соединены в треугольник и питают выпрямительный мост, состоящий из 12 кремниевых диодов. По постоянному току мост соединен параллельно. Предусмотрено три ступени автоматического переключения количества витков в первичной обмотке трансформатора при изменении входного напряжения. Точность стабилизации выпрямленного напряжения равна $\pm 6,6\%$, к. п. д. = 0,8, вес 4,4 кг, относительный вес 1,8 кг/квт, $\cos \varphi = 0,95$. Для охлаждения выпрямителя применен вентилятор.

Трансформаторно-выпрямительный блок ТВБ-3 (мощность 3 квт) выполнен по схеме рис. 2.7. Номинальная нагрузка блока 110 а. При нормальной работе блок рассчитан на изменение частоты на входе в диапазоне 380÷420 гц. В аварийных случаях при повреждении регулятора частоты блок допускает изменение частоты на входе в диапазоне 360÷800 гц. Блок состоит из трансформатора с первичной обмоткой, соединенной в звезду, и двумя вторичными обмотками, соединенными в звезду и треугольник. Вторичные обмотки питают выпрямительный мост, состоящий из 12 кремниевых диодов. По постоянному току мост соединен параллельно.

Блок обеспечивает на выходе напряжение 29 в при нагрузке 10 а и 25,5 в при нагрузке 100 а при входном напряжении переменного тока 204 и 196 в соответственно. При номинальном входном напряжении переменного тока 200 в блок обеспечивает выходное напряжение 28,4 в при токе 10 а и 26,2 при токе 100 а. Таким образом, колебание напряжения в этом случае 2,2 в.

В блоке предусмотрена защита от перегрева выпрямителя и трансформатора с помощью термовыключателей. Термовыключатель выпрямителя срабатывает при температуре 150° С, а трансформатора — при 200° С. Термовыключатели соединены параллельно и замыкают цепь сигнальной лампочки. Когда температура нагрева выпрямителя или трансформатора падает соответственно до 125 и 170° С, контакты термовыключателей размыкаются и сигнальная лампа гаснет. На выходе постоянного тока имеется шунт для амперметра.

Трансформатор блока состоит из одного трехфазного Е-образного сердечника и обмоток из алюминиевой ленты. 30-амперные кремниевые диоды смонтированы на охлаждающихся ребрах, изолированных от корпуса блока. При монтаже блока на л. а. предполагается его охлаждение воздухом.

Блок допускает двухминутную перегрузку током 150 а при напряжении 25,5 в в течение каждые 15 мин работы при номинальной нагрузке.

Трансформаторно-выпрямительный блок ТВБ-6 (мощность 6 квт) выполнен по схеме рис. 2.5. Номинальная нагрузка блока 200 а. Блок состоит из трансформатора с первичной

и двух вторичных обмоток, соединенных в звезду. Вторичные обмотки питают выпрямительный мост, состоящий из 12 кремниевых диодов. По постоянному току мост соединен параллельно.

В блоке имеется термовыключатель, срабатывающий при 120° и защищающий выпрямитель и трансформатор от перегрева.

Диапазон выходного напряжения 26,5—32,5 в. Точность стабилизации выходного напряжения $\pm 10\%$, к. п. д. = 0,8, вес 8,75 кг, относительный вес 1,4 кг/квт, $\cos \varphi = 0,98$.

§ 4. РАЗДЕЛЬНАЯ РАБОТА ТРАНСФОРМАТОРНО-ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫХ БЛОКОВ (ТВБ)

Трансформаторно-выпрямительный блок получает питание от основной сети переменного тока, его входное напряжение зависит от точности работы регуляторов напряжения основной системы переменного тока, а также от мощности одновременно включенных потребителей, питающихся с этой шины.

При неизменном напряжении питания ТВБ величина выходного напряжения постоянного тока зависит только от величины нагрузки.

На рис. 2.8 показаны нагрузочные характеристики ТВБ при различных значениях входного напряжения. Из характеристик очевидно, что изменение входного напряжения не сказывается на допустимой величине тока и каждый выпрямитель может нагружаться номинальным током, т. е. иметь максимальный коэффициент использования, равный единице.

Для повышения стабильности выходного напряжения постоянного тока нерегулируемые блоки ТВБ целесообразно запитывать с первичных распределительных шин переменного тока, где напряжение имеет минимальное колебание в пределах допуска регулятора напряжений основной системы.

Рассмотрим линию с сосредоточенной нагрузкой на конце, питаемую от выпрямителя, имеющего постоянное напряжение переменного тока на входе. В этом случае напряжение на выходе изменяется только пропорционально току нагрузки.

Колебание напряжения на клеммах потребителя $\Delta U_{\text{п}}$ не должно превышать допустимого значения $\Delta U_{\text{п, доп}}$, которое по нормализуется величиной $\pm 10\%$ от номинального значения:

$$\Delta U_{\text{п}} = U_{\text{п max}} - U_{\text{п min}} \leq \Delta U_{\text{п, доп}}$$

Максимальное напряжение у потребителя $U_{\text{п max}}$ возможно только при максимальном входном напряжении переменного тока, а минимальное $U_{\text{п min}}$ только при минимальном входном напряжении.

Начальный участок нагрузочной характеристики выпрямителя имеет очень сложный закон изменения, но этого можно избежать, включая незначительную нагрузку. В практических расчетах начальный участок характеристики исключают путем линеаризации

всей характеристики, как это показано на рис. 2.8. Тогда напряжения холостого хода выпрямителей условно можно переместить соответственно из точек со штрихами в точки без штрихов, расположенные на линии mn . Величинами выходных напряжений холостого хода выпрямителя, полученными в этом случае, следует пользоваться при расчетах падения напряжений в сети с сосредоточенной нагрузкой в конце линии.

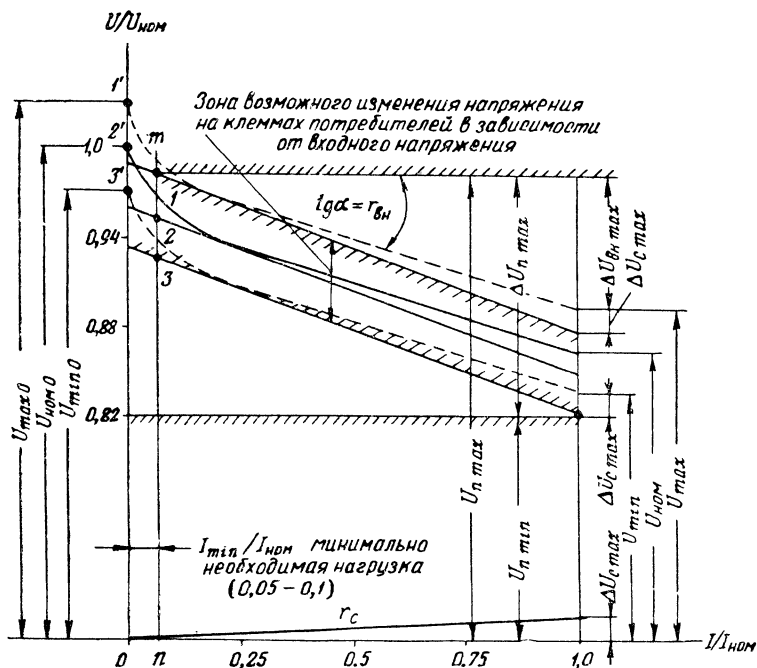


Рис. 2.8. Нагрузочная характеристика ТВБ при различных значениях входного напряжения

Допустимое падение напряжения в сети от ТВБ до сосредоточенной нагрузки в конце линии необходимо рассчитывать, исходя из условия минимального выходного напряжения выпрямителя, обусловленного минимальным входным напряжением переменного тока (точка 3).

Из нагрузочных характеристик выпрямителя следует, что величины падений напряжений $\Delta U_{\text{вн}}$ и ΔU_c на сопротивлениях выпрямителя $r_{\text{вн}}$ и сети r_c изменяются пропорционально нагрузке и достигают своей максимальной величины при номинальном ее значении.

Для получения наибольшей стабильности напряжения на клеммах потребителей нагрузку необходимо распределять таким образом, чтобы в крейсерском режиме полета она имела оптимальное и постоянное значение.

§ 5. ОСОБЕННОСТИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ТРАНСФОРМАТОРНО-ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫХ БЛОКОВ (ТВБ)

Трансформаторно-выпрямительные блоки (ТВБ) могут выполняться в двух вариантах: с системой регулирования первичного напряжения, которая поддерживает напряжения на выходе выпрямителя неизменным и без системы регулирования, когда выходное напряжение изменяется в зависимости от величины нагрузки и питающего напряжения.

Применение системы регулирования стабилизирует выходное напряжение и обеспечивает наиболее равномерное распределение тока между ТВБ. Однако это связано с введением дополнительных элементов автоматики, усложнением конструкции трансформатора, что приводит к снижению надежности и значительному увеличению веса блока.

Блоки с нерегулируемым напряжением имеют наиболее простую конструкцию, меньший вес, габариты и повышенную надежность. При рациональном размещении и оптимальных параметрах напряжения питания ТВБ могут обеспечить нормальное напряжение на клеммах потребителей. На л. а. получили практическое применение ТВБ без системы регулирования.

Целесообразность применения ТВБ без системы регулирования входного напряжения или с ней зависит от относительного веса. Если относительный вес ТВБ с системой регулирования больше относительного веса нерегулируемого блока, то следует применять последний при условии, что он обеспечивает удовлетворительное качество энергии.

Относительный вес ТВБ без системы регулирования зависит от числа параллельно работающих блоков и определяется формулой

$$\bar{G}^* = \frac{G \cdot n \cdot 10^3}{U_{\text{ном}} \cdot I_{\text{доп}}} = \frac{G \cdot n \cdot 10^3}{U_{\text{ном}} \cdot I_{\text{ном}} \cdot n \cdot K_{\text{и}}} = \frac{G \cdot 10^3}{U_{\text{ном}} \cdot I_{\text{ном}} \cdot K_{\text{и}}} \text{ [кг/квт]},$$

где G — вес блока в кг;

n — число блоков;

$I_{\text{доп}}$ — суммарный допустимый ток в а;

$U_{\text{ном}}$ и $I_{\text{ном}}$ — номинальные напряжение в в и ток блока в а;

$K_{\text{и}}$ — коэффициент использования.

Относительный вес ТВБ с системой регулирования не зависит от числа параллельно работающих блоков и равен

$$\bar{G}_p^* = \frac{G_p \cdot n \cdot 10^3}{U_{\text{ном}} \cdot I_{\text{ном}} \cdot n} = \frac{G_p \cdot 10^3}{U_{\text{ном}} \cdot I_{\text{ном}}} \text{ [кг/квт]}.$$

Характер совпадения характеристик параллельно работающих ТВБ существенно влияет на равномерность распределения нагрузки между ними.

Рассмотрим работу трансформаторно-выпрямительных блоков без системы регулирования входного напряжения.

Особенности определения количества и мощности ТВБ. Методика определения количества и суммарной мощности параллельно работающих ТВБ особенно на разнесенную нагрузку несколько отличается от методики, применяемой к энергосистеме постоянного тока с параллельно работающими генераторами.

В энергосистеме с генераторами постоянного тока количественное распределение суммарного тока нагрузки по шинам распределительных устройств практически не влияет на равномерность загрузки генераторов; необходимо только, чтобы суммарная нагрузка потребителей не превышала суммарной мощности источников с учетом коэффициента неравномерности.

В энергосистеме с параллельно работающими ТВБ при определении суммарно допустимой нагрузки потребителей необходимо учитывать не только суммарную мощность параллельно работающих ТВБ на общую сеть, но их количество, места подключения и распределение нагрузки потребителей по шинам распределительных устройств. В целях исключения возможности перегрузки отдельных ТВБ необходимо для каждого из них строить индивидуальные графики нагрузок для нормального и аварийного режимов работы, учитывая характер изменения нагрузок по шинам.

При эксплуатации могут встречаться различные случаи загрузки шин распределительных устройств и соответственно выпрямительных блоков.

В процессе наземной проверки и отладки оборудования и дневных полетов в несложных метеорологических условиях нагрузка выпрямителей не будет достигать их максимального допустимого значения, а при ночных полетах в сложных метеорологических условиях нагрузка источников значительно возрастет, но она не должна достигать предельно допустимой величины.

Для обеспечения бесперебойного электроснабжения потребителей энергосистема постоянного тока должна рассчитываться с учетом возможного выхода из строя отдельных ТВБ, т. е. должна иметь резервное количество блоков, работающих в нормальном режиме с недогрузкой.

При проектировании энергосистем постоянного тока с генераторами дается 75—100%-ный резерв количества генераторов и соответственно суммарной мощности. В энергосистемах с ТВБ резервирование по количеству и мощности может быть снижено до 50—25%, так как выпрямители, будучи статическими элементами, обладают более высокой надежностью, чем электрические машины.

Если общее количество параллельно работающих ТВБ принять равным n , то располагаемую мощность следует считать с учетом возможного выхода из строя любого блока, т. е. на $n-1$. Мощность вторичных энергосистем постоянного тока составляет не более 5—10% от всей потребляемой мощности электрической энер-

питания, нагружается номинальным током, а второй ТВБ берет на себя оставшуюся нагрузку

$$I_2 = I_{\text{доп}} - I_{\text{ном}}.$$

С уменьшением разности входных напряжений возрастает равномерность загрузки ТВБ и увеличивается суммарный допустимый ток нагрузки.

На наклон приведенной нагрузочной характеристики ТВБ оказывает влияние сопротивление фидера. Если сопротивления фидеров одинаковы, то они не оказывают влияние на равномерность распределения тока при параллельной работе ТВБ. Если же сопротивления фидеров различны, то их влияние на равномерность распределения токов следует учитывать. В авиационной практике фидеры источников, как правило, выполняются симметричными и поэтому наклон характеристик одинаков. Такие характеристики и рассматриваются в дальнейшем.

Эффективность использования параллельно работающих ТВБ характеризуется коэффициентом использования, который определяется отношением допустимого тока нагрузки к общему суммарному номинальному току параллельно работающих ТВБ:

$$K_{\text{и}} = \frac{I_{\text{доп}}}{\sum I_{\text{ном}}}.$$

Для параллельной работы двух ТВБ коэффициент использования определяется как

$$K_{\text{и}2} = \frac{I_{\text{доп}}}{2I_{\text{ном}}} = \frac{I_{\text{ном}} + I_2}{2I_{\text{ном}}} = \frac{2I_{\text{ном}} - \Delta I_2}{2I_{\text{ном}}} = 1 - \frac{\Delta I_2}{2I_{\text{ном}}}.$$

При параллельной работе нескольких ТВБ суммарный допустимый ток нагрузки изменяется в зависимости от разности напряжений питания. Чем больше число ТВБ, имеющих минимальное напряжение питания, тем меньше суммарный допустимый ток нагрузки, который достигает своей минимальной величины при питании одного ТВБ максимальным напряжением, а остальных — минимальным.

Суммарный допустимый ток нагрузки в зависимости от количества параллельно работающих ТВБ определяется:

$$\text{для двух } I_{2\text{доп}} = I_{\text{ном}} + I_2;$$

$$\text{для трех } I_{3\text{доп}} = I_{\text{ном}} + 2I_2;$$

$$\dots \dots \dots$$

$$\text{для } n I_{n\text{доп}} = I_{\text{ном}} + (n-1)I_2.$$

С увеличением числа параллельно работающих ТВБ и разбаланса напряжений питания снижается коэффициент использования. Для увеличения $K_{\text{и}}$ следует стремиться к уменьшению разбаланса напряжений питания блоков.

§ 7. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ТВБ НА РАЗНЕСЕННУЮ НАГРУЗКУ

Параллельная работа ТВБ на разнесенную нагрузку аналогична параллельной работе генераторов постоянного тока, подключенных на разнесенные распределительные устройства. Однако ТВБ с нерегулируемым входным напряжением имеют некоторые особенности распределения тока между блоками.

Рассмотрим параллельную работу двух ТВБ на разнесенную нагрузку, представленную на рис. 2.11. Положим напряжение питания ТВБ₁ выше ТВБ₂. Максимально допустимые нагрузки зави-

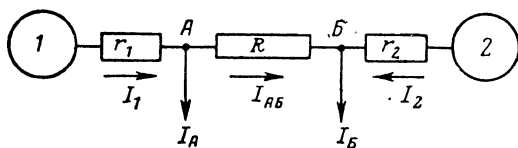


Рис. 2.11. Схема параллельной работы ТВБ на разнесенную нагрузку

сят от характера их включения. Возможны два характерных случая включения нагрузки:

- 1) $I_A \neq 0$; $I_B = 0$; 2) $I_A \neq 0$; $I_B \neq 0$.

1. Из графика (рис. 2.12) следует, что максимально допустимый ток нагрузки, подключенной к точке А, зависит от величины сопротивления R , включенного между точками А и Б. Если $R=0$, то $I_{дА0} = I_{1А0} + I_{2А0}$, что соответствует максимально допустимой сосредоточенной нагрузке $I_{д0}$ на два параллельно включенных ТВБ. При $R>0$; $I_{дА} = I_{1А} + I_{2А}$, при этом $I_{дА} < I_{д0}$. Это снижение допустимого тока нагрузки объясняется работой ТВБ₂ на нагрузку через сопротивление R . С увеличением сопротивления R уменьшается допустимый ток вследствие снижения тока ТВБ₂ и при $R=\infty$ $I_{дА} = I_{1\text{ ном}}$.

2. Если при наличии сопротивления R нагрузки подключены к точкам А и Б, то суммарный допустимый ток нагрузки также снижается относительно $I_{д0}$ пропорционально увеличению уравнивающего тока между этими точками:

$$I_{дАБ} = I_{1А} + I'_{2А} + I_{2Б}.$$

При соответствующем распределении нагрузок в точках А и Б возможно отсутствие уравнивающего тока. В этом случае каждый ТВБ работает на собственную нагрузку и суммарный допустимый ток достигает своего максимального значения $I_{д0}$.

Из рассмотрения графика следует, что если допустить нагрузку на шине, ближайшей к ТВБ₁, равной его номинальному току, то вторая нагрузка будет величиной строго определенной, а суммарная их величина не должна превышать допустимого тока.

Схема параллельной работы ТВБ на разнесенную нагрузку представляет линию с двусторонним питанием, в которой токи, отдаваемые выпрямительными блоками, определяются выражениями:

$$I_1 = \frac{U_1 - U_2}{r_1 + r_2 + R} + \frac{I_A(r_2 + R) + I_B r_2}{r_1 + r_2 + R};$$

$$I_2 = \frac{U_2 - U_1}{r_1 + r_2 + R} + \frac{I_B(r_1 + R) + I_A r_1}{r_1 + r_2 + R},$$

где U_1 и U_2 — напряжения ТВБ при минимально необходимой нагрузке ($\sim 0,1 I_{\text{ном}}$);

$r_1 = r_{1\phi} + r_{1\text{вн}}$ и $r_2 = r_{2\phi} + r_{2\text{вн}}$ — полное сопротивление цепи ТВБ, включающее его внутреннее сопротивление $r_{\text{вн}}$ и сопротивление внешней цепи r_{ϕ} до ближайшей нагрузки.

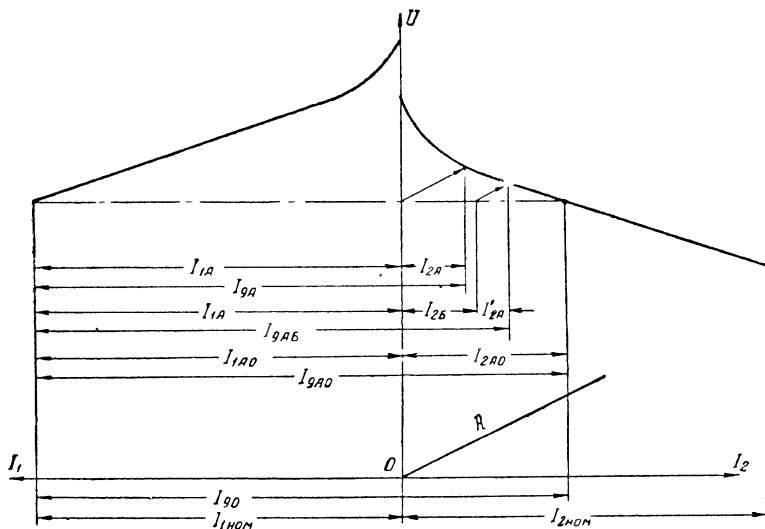


Рис. 2.12. Распределение нагрузок между параллельно работающими ТВБ

Первое слагаемое в выражениях для токов I_1 и I_2 представляет собой уравнивающий ток в линии, обусловленный неравенством напряжений выпрямителей U_1 и U_2 .

Из формул следует, что даже при $U_1 = U_2$ выпрямители нагружаются неравномерно и нагрузки выравниваются только при $r_1 = r_2$ и $I_A = I_B$. В этом случае ток в сопротивлении R отсутствует.

Таким образом, как и для сосредоточенной нагрузки, максимально допустимый ток двух параллельно включенных ТВБ имеет

место при отсутствии тока через сопротивление R связи между выпрямителями.

При параллельной работе нескольких трансформаторно-выпрямительных блоков на разнесенную нагрузку и отсутствии уравнительных токов коэффициент использования имеет то же значение, что и для параллельной работы ТВБ на сосредоточенную нагрузку.

§ 8. ВТОРИЧНАЯ ЭНЕРГОСИСТЕМА ПОСТОЯННОГО ТОКА С РАЗДЕЛЬНОЙ РАБОТОЙ ТВБ

На рис. 2.13 представлена вторичная энергосистема постоянного тока напряжением 27 в с раздельной работой трансформаторно-выпрямительных блоков (ТВБ). В рассматриваемой схеме источниками энергии являются три ТВБ, однако количество и мощ-

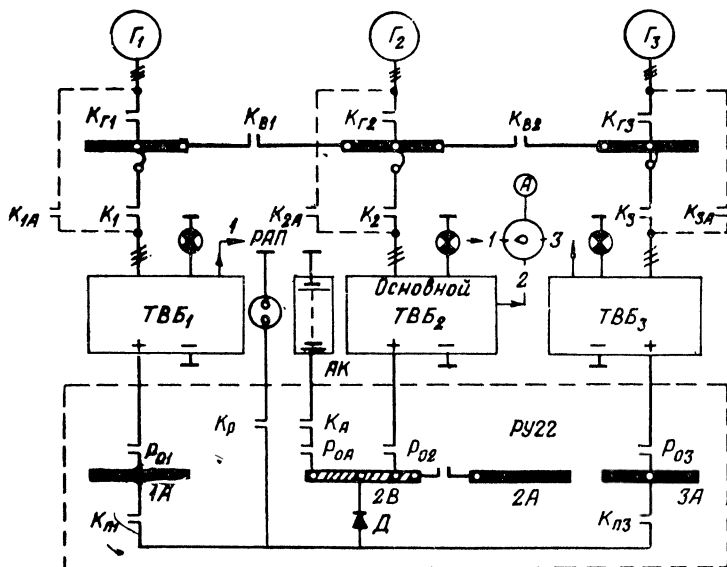


Рис. 2.13. Схема вторичной энергосистемы постоянного тока с раздельной работой ТВБ

ность выпрямителей должны выбираться в зависимости от потребности в энергии постоянного тока и особенностей летательного аппарата.

При нормальной работе энергосистема представляет три автономных системы с самостоятельным источником энергии в каждой. В этом случае с каждого выпрямительного блока может сниматься номинальная мощность.

При нормальной работе трансформаторно-выпрямительные блоки рассчитываются на изменение частоты на входе в диапазоне 380÷420 гц. Однако в аварийных случаях при повреждении регу-

латора частоты блоки допускают изменение частоты на входе в диапазоне 360—800 гц, для чего схемой предусматривается переключение питания этих блоков непосредственно на клеммы генератора переменного тока.

При нормальной работе энергосистемы каждый выпрямитель работает на свои собственные распределительные шины: ТВБ₁ на шину 1А, ТВБ₂ на шины 2А и 2В и ТВБ₃ на шину 3А.

Блок 2 является основным, так как от него питается аварийная шина 2В, к которой подключены жизненно важные потребители электроэнергии. Параллельно с блоком 2 и непосредственно на аварийную шину подключен аккумулятор. В цепи блока 2 установлен блокировочный диод, который допускает питание шины 2А и аварийной шины 2В от блоков 1 и 3, но не допускает питание шин 1А и 3А от блока 2.

В фидере каждого ТВБ установлено реле обратного тока Р_о, которое в случае короткого замыкания на выходной стороне блока отключает его от сети. Реле обратного тока Р_{о.а} предусмотрено также в фидере аккумуляторной батареи, которое при коротком замыкании на клеммах и внутри батареи отключает ее от сети.

Схемой предусмотрена параллельная работа блоков 1 и 3, включаемых на этот режим контакторами К_{ш1} и К_{ш3}. В этом случае их суммарная допустимая нагрузка в длительном режиме составляет примерно 1,6 I_{ном}.

При выходе из строя любого блока все шины могут питаться от оставшихся двух блоков.

Аварийное питание постоянным током предусмотрено при отказе всех трех генераторов переменного тока. В качестве источника энергии используется аккумуляторная батарея. Количество и емкость аккумуляторных батарей в каждом конкретном случае определяется мощностью потребителей и условиями их эксплуатации.

При выходе из строя всех генераторов переменного тока аккумуляторная батарея обеспечивает питанием связь, навигационные приборы, освещение приборной доски пилота, дежурное освещение и статический преобразователь, который в свою очередь обеспечивает питанием аварийные приборы, в течение времени, необходимого для завершения полета.

В наземных условиях батарея может подзаряжаться от аварийного агрегата питания или аэродромного источника питания переменного тока через трансформаторно-выпрямительный блок.

Для наземного питания потребителей постоянного тока от аэродромного источника имеется розетка с автоматикой, исключающей возможность параллельной работы аэродромных источников энергии с бортовыми.

Преимущества. 1. Коэффициент использования ТВБ может достигать единицы, т. е. выпрямитель можно длительно нагружать номинальной мощностью.

2. Обеспечивается бесперебойное питание энергией высокого качества одного из дублированных потребителей при повреждениях в системе любого ТВБ.

Недостатки. При выходе из строя какого-либо ТВБ (1 или 3) шина его временно обесточивается, при этом имеется возможность включить ее на оставшийся выпрямитель.

Кроме рассмотренной вторичной системы, предусматриваются еще вспомогательные системы постоянного тока с маломощными двухполупериодными выпрямителями, которые преобразуют переменный ток одной фазы напряжением 115 в в энергию постоянного тока. Такой вид энергии, например в пассажирских самолетах, подается в штепсельные розетки туалетных комнат и кабин экипажа для бытовых целей.

Вспомогательные системы могут применяться также в любых вторичных системах постоянного тока, рассматриваемых ниже.

§ 9. ВТОРИЧНАЯ ЭНЕРГОСИСТЕМА ПОСТОЯННОГО ТОКА С РАЗДЕЛЬНОЙ РАБОТОЙ И РЕЗЕРВИРОВАНИЕМ ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫХ БЛОКОВ

Вся энергосистема постоянного тока напряжением 27 в разделена на две самостоятельные системы, которые в нормальных условиях работают совершенно изолированно друг от друга. Схема энергосистемы приведена на рис. 2.14.

Источниками энергии в каждой системе являются по одному основному трансформаторно-выпрямительному блоку (ТВБ).

Выпрямители получают питание с главных распределительных шин генераторов переменного тока и подают постоянный ток к соответствующим основным распределительным шинам А. К шине А с помощью контактора подключаются аккумулятор с собственной шиной В. В этом случае параллельно работают выпрямитель с аккумулятором, который снижает амплитуду пульсаций выпрямленного тока и снимает пики нагрузок, возникающие при включении потребителей.

С шины А энергия подается непосредственно к некоторым потребителям и к вторичным распределительным шинам, а также через контактор к вспомогательным шинам Б, которые по необходимости могут отключаться, например, при переходе на питание первичной энергосистемы переменного тока от аварийного турбогенератора.

Каждая система имеет главный переключатель источников питания с тремя положениями «Включено», «Отключено» и «Батарея изолирована». При нормальных условиях работы эти переключатели находятся в положении «Включено». При отказе основного и резервного ТВБ переключатель устанавливается в положение «Батарея изолирована». Аккумулятор в этом случае питает только жизненно важные потребители, подключенные к шине В.

При отказе ТВБ загорается сигнальная лампа, цепь которой замыкается с помощью реле напряжения постоянного тока, реагирующего на снижение напряжения до напряжения батареи, имеющей 24 в или меньше.

Резервный трансформаторно-выпрямительный блок предназначен для питания любой системы при отказе основного ТВБ и соот-

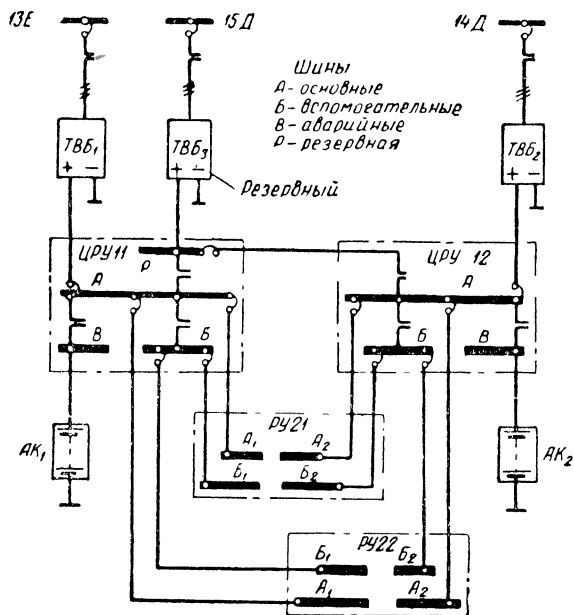


Рис. 2.14. Схема энергосистемы постоянного тока с разделением работой и резервированием выпрямительных блоков

ветственно подключается вручную переключателем и контакторами. В нормальных условиях эксплуатации входной и выходной каналы блока отключены.

В условиях работы аварийного турбогенератора питание переменным током подается только на резервный ТВБ. Основные ТВБ при этом обесточены, шины Б отключены, а аккумуляторы питают соответственно свои шины А и В. Резервный ТВБ может переключаться на параллельную работу с аккумулятором любой системы.

В наземных условиях потребность в постоянном токе удовлетворяется за счет подсоединения наземного источника переменного тока и установки основных переключателей постоянного тока в положение «Включено», обеспечивающее включение основных ТВБ.

§ 10. ВТОРИЧНАЯ ЭНЕРГОСИСТЕМА ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТОЙ ТВБ

На рис. 2.15 представлена схема вторичной энергосистемы постоянного тока напряжением 27 в с параллельной работой четырех трансформаторно-выпрямительных блоков (ТВБ).

Выпрямительный блок ТВБ₁ является основным и работает только на свои собственные шины. Блоки ТВБ₂, ТВБ₃ и ТВБ₄ также работают на свои собственные шины, но могут подключаться и на параллельную работу через синхронизирующую шину. Эти выпрямители через блокировочный диод Д подпитывают фидер блока ТВБ₁, что особенно важно при отказе последнего.

В выходных цепях каждого блока установлены реле обратного тока, исключающие переход энергии от исправных блоков в неисправный.

Каждый блок запитывается с соответствующей генераторной шины переменного тока. Основной блок 1 может получать питание непосредственно с клемм любого генератора или аэродромного источника. Это переключение осуществляется специальным переключателем.

В системе постоянного тока предусмотрена аккумуляторная батарея, которая может заряжаться от основного блока 1 или аэродромного источника, если включен ее выключатель.

При отказе всех ТВБ аккумулятор питает основную шину, обеспечивая энергией постоянного тока некоторые основные потребители, необходимые для управляющих функций.

Из схемы очевидно, что основная шина постоянного тока может получать энергию от любого источника — четырех выпрямителей и аккумулятора. С основной шины получают питание основная приборная шина и основная радиошина, которая может отключаться вручную или автоматически от основной шины при неисправности выпрямительных блоков, устраняя разряд батареи на радиопотребители.

С шины ТВБ₃ запитываются приборная шина и радиошина, последняя при необходимости может отключаться.

Работа энергосистемы постоянного тока контролируется с помощью вольтметра и амперметров, последовательно подключаемых к шинам ТВБ или аккумулятора.

Принципиальная схема контроля представлена на рис. 2.16. Основное достоинство такой схемы сокращение количества приборов, а включение шунтов амперметров в минусовую цепь исключает необходимость применения защиты.

Преимущества. 1. Обеспечивает параллельную работу выпрямительных блоков.

2. Имеет малое количество предохранителей.

3. Почти отсутствует переключение силовых проводов.

4. При коротком замыкании в фидере выпрямителя автоматически отключается только выпрямитель с поврежденным фидером.

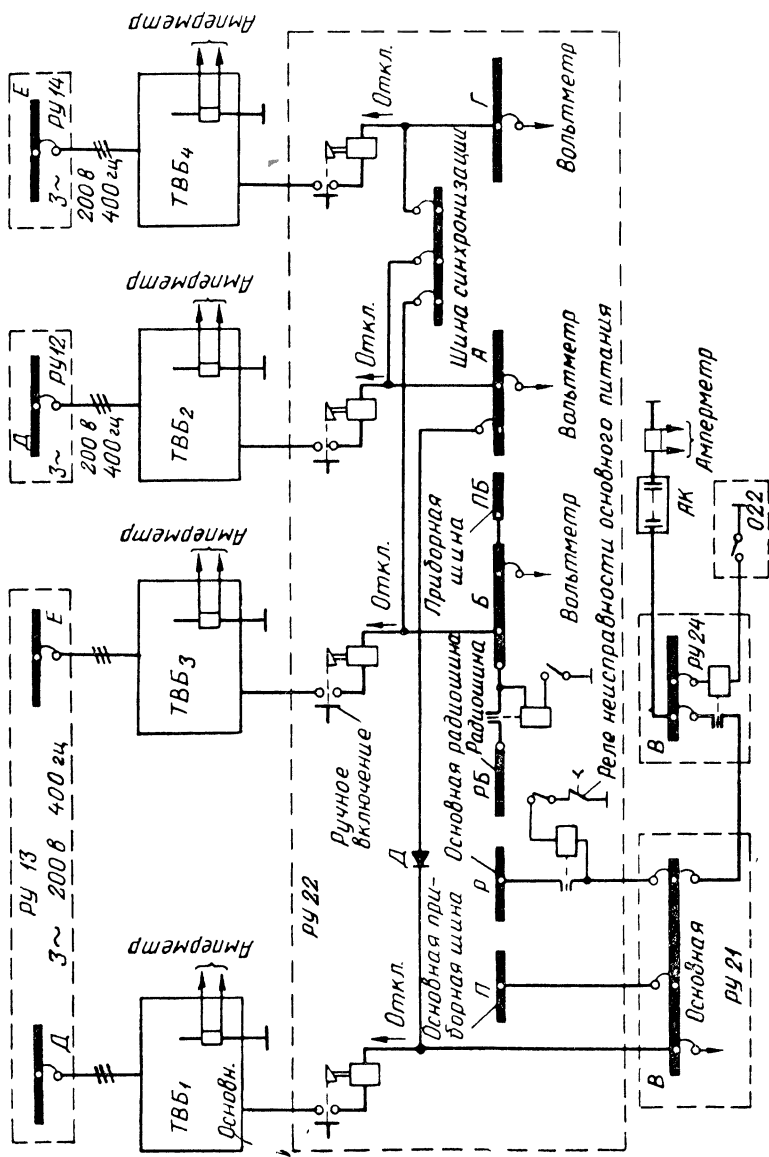


Рис. 2.15. Схема энергосистемы постоянного тока с параллельной работой ТВБ

5. При коротком замыкании на шине выводится из строя только поврежденная шина и непосредственно с ней связанные.

6. Удобна в обслуживании и эксплуатации ввиду сосредоточенного размещения аппаратуры.

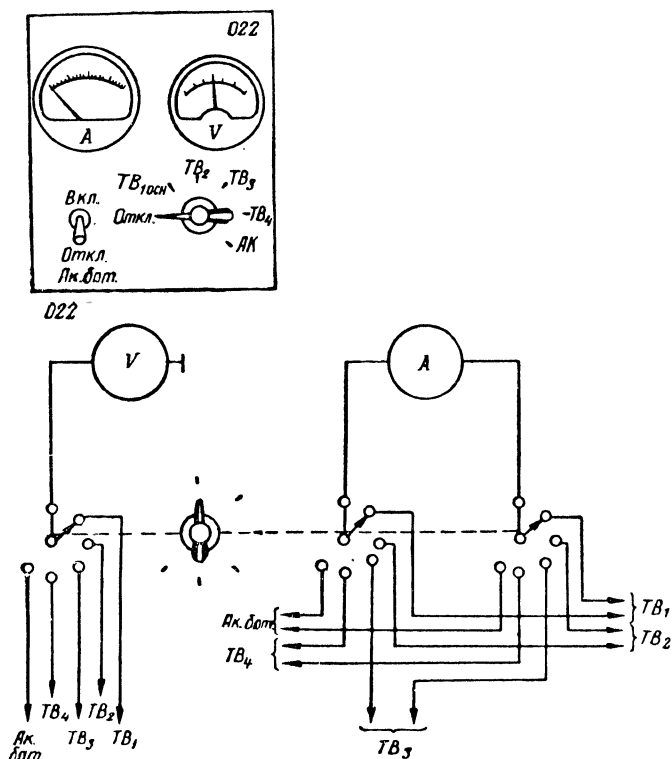


Рис. 2.16. Принципиальная электросхема контроля энергосистемы постоянного тока

Недостатки. 1. Наличие последовательно связанных шин, что снижает их надежность.

2. Концентрированное размещение аппаратуры и распределительных шин увеличивает вероятность выхода из строя всей энергосистемы.

§ 11. ВТОРИЧНАЯ ЭНЕРГОСИСТЕМА ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТОЙ ТВБ В КОЛЬЦЕВОЙ СХЕМЕ

Вторичная энергосистема постоянного тока напряжением 27 в с параллельной работой ТВБ и с кольцевой схемой питательной сети представлена на рис. 2.17.

Источниками энергии служат четыре трансформаторно-выпрямительных блока.

Распределительные устройства постоянного тока располагаются в местах сосредоточения потребителей, а блоки выпрямителей в непосредственной близости от них, что позволяет повысить надежность при минимальном весе питательной сети.

Каждый ТВБ запитывается от основной шины соответствующего генератора переменного тока. В выходных цепях блоков установлены реле обратного тока.

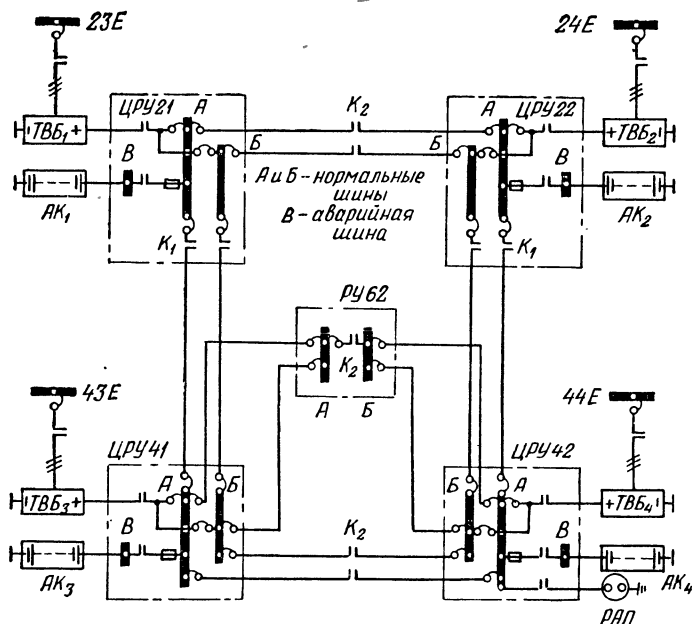


Рис. 2. 17. Кольцевая схема энергосистемы постоянного тока с параллельной работой выпрямителей

Выпрямительные блоки работают параллельно на общее двухканальное энергетическое кольцо с двусторонней защитой питающих линий.

При равномерном распределении нагрузки по шинам каждый выпрямитель работает на собственную шину ЦРУ, а в соединительных проводах между ЦРУ течет незначительный уравнивающий ток, величина которого возрастает только при отказе какого-либо блока. Поэтому соединительные провода имеют сечение небольшое, но достаточное для поддержания удовлетворительного напряжения на шине вышедшего из строя выпрямителя.

Вторичные распределительные устройства запитываются по четырехканальной кольцевой схеме с двусторонней защитой проводов.

Кольцевая многоканальная питательная сеть вторичной энергосистемы постоянного тока с параллельной работой выпрямителей и двусторонней защитой питательных линий обладает повышенной надежностью и живучестью в сравнении с другими конфигурациями питательной сети.

Преимущества. 1. При выходе из строя любого источника энергии все потребители получают нормальное питание за счет кольцевания сети.

2. При симметричном распределении нагрузок по шинам в нормальном режиме эксплуатации отсутствует уравнильный ток в соединительных проводах.

3. При коротком замыкании в любой линии питания селективно срабатывает двусторонняя защита и участок линии с коротким замыканием отключается от сети. Потребители получают энергию практически того же качества.

4. При обрыве любого провода энергоснабжение потребителей не нарушается.

5. При коротком замыкании любой шины срабатывает защита и шина изолируется от сети. В этом случае обесточиваются только потребители, подключенные к этой шине.

Кольцевая, многоканальная, защищенная питательная сеть практически сохраняет живучесть до последнего источника энергии при неоднократных замыканиях и обрывах линий питания.

В энергосистеме предусмотрены четыре аккумуляторных батареи, подключенные соответственно параллельно с каждым выпрямительным блоком. В нормальных режимах полета аккумуляторы подзаряжаются и снимают пики нагрузок при включении потребителей с большими пусковыми токами.

При отказе всех ТВБ аккумуляторы подают энергию к собственным распределительным шинам, от которых получают питание особо важные потребители, необходимые для управляющих и пилотажных функций.

На земле при отсутствии аэродромного источника аккумуляторы используют для запуска турбоагрегата кондиционирования и питания других потребителей.

Работа энергосистемы контролируется с помощью вольтметра и амперметра, последовательно подключаемых с помощью переключателя к источникам энергии и распределительным шинам. Принципиальная электросхема контроля аналогична рассмотренной выше.

В энергетическом кольце предусматриваются контакторы K_1 или K_2 , делящие энергосистему на две самостоятельные автономные при взлете и посадке и в других ответственных режимах полета для совершенно автономного питания дублированных каналов потребителей.

Глава I

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ПО СИСТЕМАМ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ

§ 1. СХЕМЫ СОЕДИНЕНИЙ ГЛАВНЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ШИН

На рис. 1.1 представлены типовые схемы соединений четырех источников энергии и главных распределительных шин. Выбор ко-

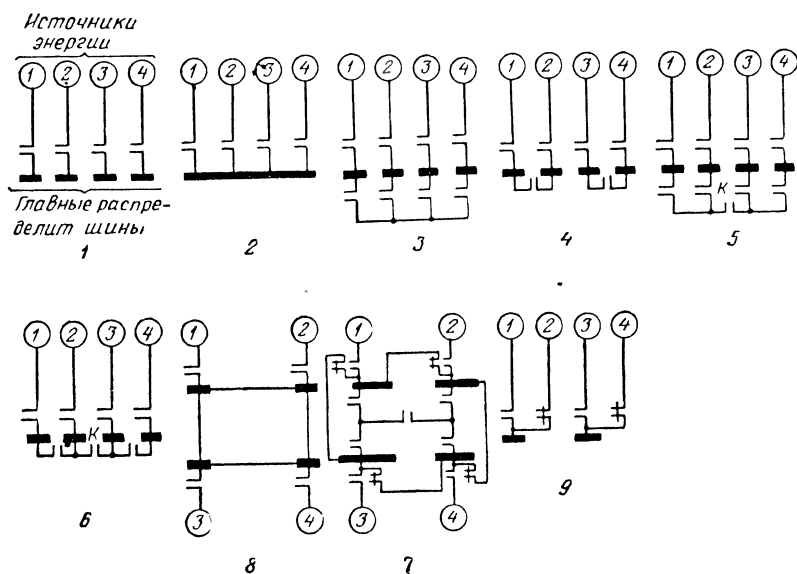


Рис. 1.1. Основные схемы соединений источников энергии и главных распределительных шин:

1—раздельная; 2—централизованная; 3—централизованная с отключением; 4—групповая; 5, 6, 7—централизованные с переключением на группы; 8—кольцевая; 9—с резервированием

личества источников энергии и главных распределительных шин зависит от типа и назначения летательного аппарата.

При четырех источниках энергии вся имеющаяся на борту электрическая нагрузка делится на четыре группы таким образом, чтобы л. а. мог безопасно продолжать полет при отказе любой из четырех главных шин. При проектировании энергосистем должны быть приняты все меры по схемам, конструкции и эксплуатации, чтобы главная шина не вышла из строя. В любом случае выход из строя одной из шин (в результате короткого замыкания или других повреждений) не должен нарушать нормальную работу остальных. При отказе главной шины потребители, непосредственно подключенные к этой шине, теряют питание. Однако количество таких потребителей можно свести к очень небольшому числу в несколько раз меньшему, чем 0,25 всех потребителей. Это достигается применением кольцевых схем для питания вторичных распределительных шин.

Провода, соединяющие генераторы с шинами и шины между собой, могут выполняться с защитой или без защиты. Быстродействующая и селективная защита существенно повышает надежность и безопасность системы при коротких замыканиях.

Если установлена селективная защита, то при к. з. на любой из главных шин выходит из строя только данная шина; если защита отсутствует, выходит из строя одна группа или вся энергосистема. Схема № 2 является наиболее уязвимой в обоих случаях.

При к. з. в линии последняя может отключаться от сети, если имеет селективную защиту. При отсутствии защиты система выходит из строя.

При выходе из строя любого источника энергии или его фидера не во всех схемах и не при всех сочетаниях отказов обеспечивается питание главных шин. В схеме № 1 одна шина обесточивается. В схемах 4, 5, 6 и 9 коэффициент использования источников может быть допущен не более 0,5. В схемах 5 и 6 коэффициент использования может быть увеличен с 0,5 до 0,67 включением контактора К. В схемах 2, 3, 7 и 8 коэффициент использования составляет 0,75.

Представленные схемы соединений источников энергии и главных распределительных шин применимы как для первичных, так и для вторичных энергосистем постоянного и переменного тока. Их достоинства, недостатки и целесообразность применения для конкретных условий рассматриваются в соответствующих разделах.

§ 2. ОСНОВНЫЕ СИСТЕМЫ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ

В настоящее время получили распространение три основных типа систем энергоснабжения: постоянного тока напряжением 27 в, трехфазного переменного тока напряжением 200 в переменной частоты и трехфазного переменного напряжением 200 в постоянной частоты.

Применение той или иной системы энергоснабжения сопровождается наличием соответствующих первичных и вторичных энерго-

систем. Рассмотрим их основные особенности и перспективы применения.

Система постоянного тока напряжением 27 в — одна из самых распространенных в мире и разнообразно используется на всех видах летательных аппаратов. Система особенно удобна для применения на л. а., где необходимая мощность не превышает 9—12 кВт на двигатель. Увеличение мощности и протяженности сети приводит к резкому увеличению сечения и веса проводов, поэтому эти системы продолжают применяться на легких гражданских и транспортных самолетах с небольшой дальностью полета.

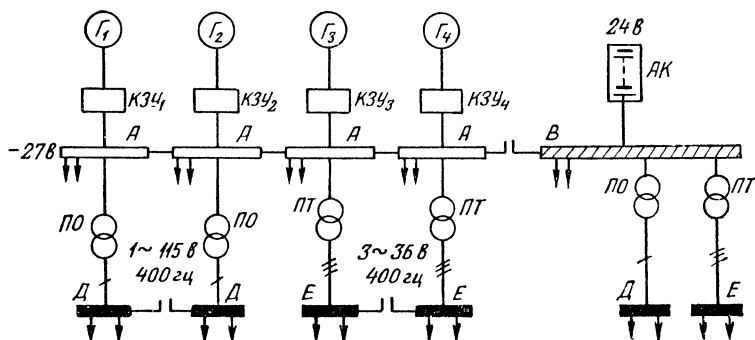


Рис. 1. 2. Схема энергоснабжения в системе постоянного тока напряжением 27 в

Типичная схема системы постоянного тока напряжением 27 в показана на рис. 1. 2. Она состоит из генераторов с непосредственным приводом от двигателя. Генераторы через свои отдельные контрольные и защитные устройства (КЗУ) соединены с главными распределительными шинами А, которые могут объединяться между собой контакторами, образуя отдельные группы или централизованную систему. Шина А может быть единой, тогда система превращается в централизованную. Аварийная шина В в нормальных условиях питается от основной, а в аварийных режимах и при неработающих двигателях на земле — от аккумулятора. Потребители переменного тока стабилизированной частоты питаются от преобразователей вторичных источников типа ПО и ПТ, а в аварийном режиме от аварийных преобразователей ПО и ПТ, получающих питание с аккумуляторной шины.

Для питания потребителей, не требующих постоянной частоты, целесообразно иметь вспомогательную первичную энергосистему с генераторами трехфазного переменного тока с приводом от двигателя. На самолетах с турбовинтовыми двигателями частота тока колеблется в пределах $\pm 5\%$, что вполне допустимо для питания

большинства аппаратуры. В этом случае мощность преобразователей значительно сокращается.

Система постоянного тока напряжением 112 в представлена на рис. 1.3.

В целях безопасности ее эксплуатации и использования агрегатов низкого напряжения появляется необходимость в создании вторичной системы постоянного тока напряжением 27 в, которая получает питание от основной системы через вращающиеся преобразователи. Потребители переменного тока стабильной частоты получают питание от преобразователей типа ПО и ПТ.

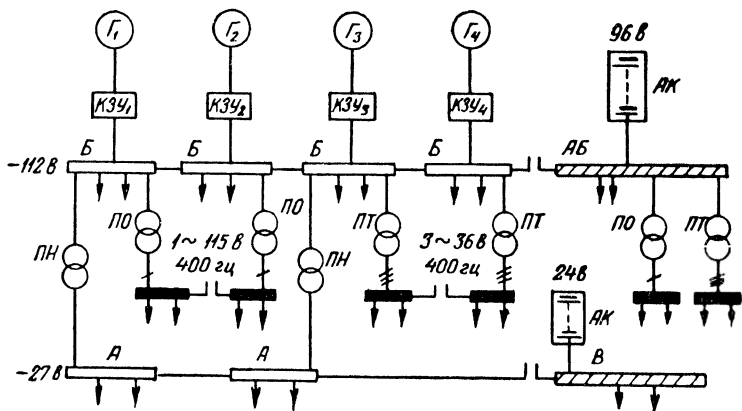


Рис. 1.3. Схема энергоснабжения в системе постоянного тока напряжением 112 в

На случай выхода из строя двигателей или приводимых ими генераторов в системе высокого и низкого напряжения имеются аккумуляторы и соответствующие аварийные шины.

Система постоянного тока напряжением 112 в, вероятно, не получит распространения на перспективных л. а. в связи с необходимостью дополнительного преобразования энергии и появлением системы переменного тока напряжением 200 в.

Система трехфазного переменного тока напряжением 200 в переменной частоты (300—900 гц) находит применение на л. а., где значительная часть потребляемой мощности приходится на тепловые нагрузки: противообледенительные устройства, бытовое оборудование, освещение и другие, которые безразличны к роду тока и частоте.

Типичная схема системы переменной частоты напряжением 200 в приведена на рис. 1.4. Генераторы переменного тока приводятся непосредственно от авиадвигателей. Частота практически колеблется в диапазоне 250÷500 гц. Основная часть генерируемой

мощности используется в виде переменного тока нестабильной частоты непосредственно с шин Г.

Для питания потребителей постоянного тока напряжением 27 в применяются трансформаторно-выпрямительные блоки ТВБ, которые преобразуют переменный ток в постоянный и подают его на шины А.

Для питания потребителей переменного тока постоянной частоты используются преобразователи ПО и ПТ, подающие соответственно энергию на шины Д и Е.

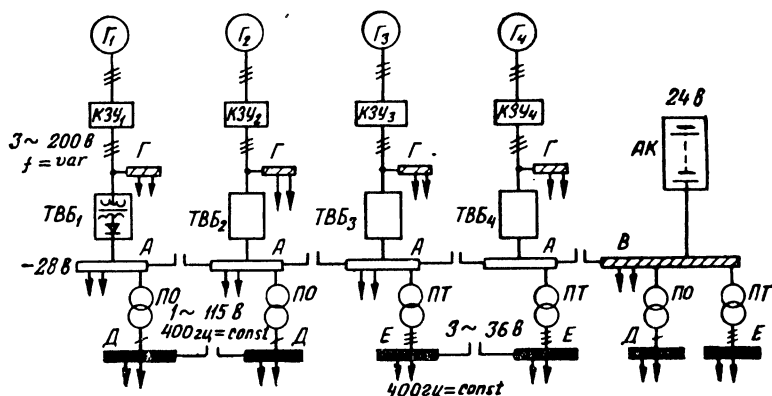


Рис. 1. 4. Схема энергоснабжения в системе переменного тока напряжением 200 в нестабильной частоты

В аварийных режимах источником энергии постоянного тока является аккумулятор, питающий непосредственно аварийные потребители низкого напряжения, включая аварийные преобразователи ПО и ПТ.

Так как размеры и вес генератора находятся в обратной зависимости от скорости вращения, то эти системы становятся тяжелыми при увеличении диапазона скоростей авиадвигателя.

Диапазон скоростей или частот не только определяет вес генератора переменного тока, но и оказывает серьезное влияние на размеры, вес и рабочие характеристики трансформаторов и двигателей переменного тока, связанных с системой. Увеличение диапазона скорости приводит к дальнейшему утяжелению системы, однако свойственная системе простота делает ее полезной там, где большая часть электрической энергии потребляется на нагрев, освещение и преобразуется в постоянный ток.

Поскольку маловероятно, что на будущих самолетах с ТВД будут применяться системы бустерного управления и очень совершенные автопилоты и навигационные системы, то система нестабильной частоты может быть первой при выборе системы для самолета такого типа.

Система трехфазного переменного тока напряжением 200 в стабильной частоты $400 \text{ гц} \pm 5\%$ вполне осуществима на самолетах с турбовинтовыми двигателями. В этом случае генераторы имеют механический привод непосредственно от авиадвигателя и могут работать только раздельно.

Типичная схема такой системы переменного тока представлена на рис. 1.5. Основная часть энергии (90—95%) используется в виде переменного тока, так как частота с допуском $\pm 5\%$ практически удовлетворяет почти все потребители переменного тока.

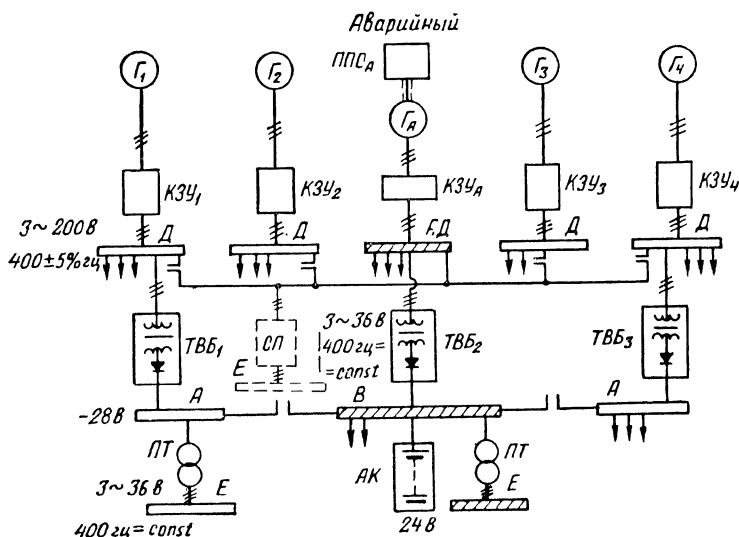


Рис. 1.5. Схема энергоснабжения в системе переменного тока напряжением 200 в частотой $400 \text{ гц} \pm 5\%$

Часть энергии (примерно 5—10%) преобразуется в постоянный ток напряжением 27 в с помощью трансформаторно-выпрямительных блоков ТВБ. Постоянный ток низкого напряжения используется для питания большого числа потребителей малой мощности, которым в принципе и необходим постоянный ток.

Некоторая доля энергии постоянного тока (примерно 3÷5%) с помощью преобразователей ПТ преобразуется в переменный трехфазный ток постоянной частоты $400 \text{ гц} \pm 2\%$ напряжением 36 в и используется для питания пилотажно-навигационного оборудования.

Однако по мере развития статических преобразователей частоты СП их применение будет в этой системе наиболее целесообразным, тем более, что мощности их незначительны. В этом случае отпадает необходимость в преобразователях ПТ и снизится мощность выпрямителей ТВБ.

Система проста, обладает высокой надежностью, имеет значительно меньший вес в сравнении с другими энергосистемами и для турбовинтовых самолетов средней и больших дальностей будет наиболее перспективной.

Системы трехфазного переменного тока напряжением 200 в постоянной частоты, применяемые на современных самолетах, намного совершенней других систем и основаны главным образом на использовании бесконтактных элементов.

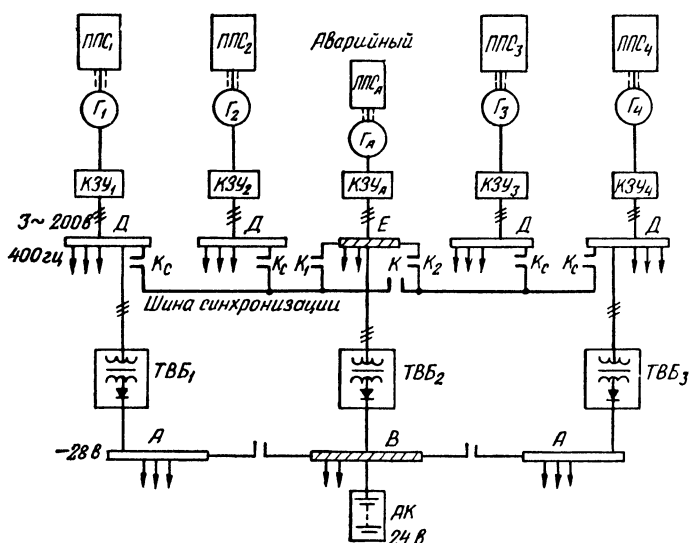


Рис. 1.6. Схема энергоснабжения в системе переменного тока напряжением 200 в постоянной частоты

На рис. 1.6 показана типовая схема системы переменного тока напряжением 200 в постоянной частоты $400 \text{ гц} \pm (0,1-1) \%$. В систему входят четыре привода постоянной скорости, которые вращают генераторы с постоянной скоростью во всем диапазоне скоростей двигателя, от режима малого газа до взлетного.

Каждый генератор подключается на собственную главную шину Д. На параллельную работу генераторы включаются контакторами К и Кс через шину синхронизации. Варьируя контакторами К, К1, К2 и Кс, можно включать генераторы на раздельную работу, на групповую по два и другие комбинации.

Для обеспечения надежного питания потребителей по двум каналам от двух совершенно независимых систем целесообразно при взлете и посадке с помощью контакторов делить систему на две автономные. При коэффициенте использования генераторов 0,5 выход из строя одного не нарушает нормального электроснабже-

ния, только оставшийся генератор будет загружен на 100%. Если же коэффициент использования генераторов 0,75, то при выходе из строя одного оставшийся перегружается на 50% своей мощности. Чтобы избежать этого, вводят автоматическую схему, которая замыкает контактор и объединяет две системы, когда выходит из строя какой-нибудь из генераторов. Возможны и другие комбинации в перераспределении нагрузок.

В качестве аварийного источника переменного тока стабильной частоты используется генератор, приводимый в движение с постоянной скоростью либо ветрянкой, либо вспомогательной силовой установкой.

Постоянный ток напряжением 27 в обеспечивается трансформаторно-выпрямительными блоками ТВБ и аккумуляторами небольшой емкости. Последние используются на стоянке и для питания аварийных потребителей постоянного тока. В аварийных условиях ТВБ, работающий от аварийного генератора, питает аварийную шину постоянного тока.

Надо полагать, что требование на две независимые энергетические системы будет расширяться и охватит самолеты с автоматическим заходом на посадку и автоматической посадкой.

Системы переменного тока постоянной частоты пригодны для применения на всех самолетах, где высока потребность в питании током стабильной частоты, поэтому они будут предпочтительнее на будущих самолетах с электрическими приводами в системах управления полетом и мощным электронным оборудованием.

Эти системы будут развиваться по пути применения бесконтактных генераторов с обмотками возбуждения и якоря, расположенными на статоре, и дифференциальных пневмомеханических приводов. Такие агрегаты могут работать при более высоких температурах, чем генераторы с вращающимися выпрямителями и гидромеханическими приводами постоянной скорости.

Рабочая температура гидромеханических приводов постоянной скорости на современных самолетах ограничена свойствами среды передачи энергии 160° С. Так как в агрегатах применяются вращающиеся детали, изготовляемые с очень малыми допусками, срок их службы сравнительно невелик. Они требуют довольно сложных гидросистем, работающих при всяких положениях резервуара и отрицательных перегрузках, и поскольку монтируются на двигателе, их демонтаж для осмотра и ремонта требует большой затраты времени и средств. Введение дифференциального пневмомеханического привода решит некоторые из этих затруднений.

§ 3. ВЫБОР СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Общая мощность бортовой электрической системы складывается из суммы расчетных нагрузок, запаса на увеличение нагрузки при дальнейшем развитии самолета и запаса на случай аварийных обстоятельств.

Для гражданских самолетов на практике принято предусматривать выход из строя только одного двигателя и приводимого им генератора без снижения нагрузки.

Выбор наиболее оптимальной энергетической системы для данного типа самолета зависит от характера нагрузок, их доли в общей мощности и особенностей эксплуатации.

Определив мощности и условия эксплуатации потребителей, их необходимо классифицировать по отношению к роду тока, напряжению и частоте. Одновременно выявляется наиболее экономичная система запуска авиадвигателя, так как в некоторых случаях запуск существенно влияет на выбор энергосистемы самолета.

Тип авиадвигателя может оказаться решающим фактором в выборе энергосистемы. Например, транспортный самолет средней дальности с ТВД может иметь большую нагрузку в виде нагревательных элементов, противообледенительных устройств винта, двигателя и планера.

В то же время двигатель имеет практически стабильную скорость вращения с точностью $\pm 5\%$. В этом случае, безусловно, наиболее перспективна энергосистема переменного тока стабильной частоты $\pm 5\%$ с раздельной работой генераторов, имеющих привод непосредственно от авиадвигателя. Для потребителей небольшой мощности, требующих повышенную точность стабилизации частоты, энергия может быть получена от преобразователей, а энергия постоянного тока напряжением 27 в от трансформаторо-выпрямительных блоков.

На трансокеанских самолетах с ТРД для нагревательных элементов противообледенительных устройств вероятнее всего использовать горячий воздух, отбираемый от двигателя, вместо электричества. В то же время требуется повышенная точность стабилизации частоты тока для связной аппаратуры, системы управления, навигационной системы и другого оборудования.

На самолетах с ТРД большой диапазон скоростей вращения авиадвигателя и, следовательно, возможны два типа энергосистем: постоянного тока напряжением 27 в и переменного тока 200/115 в постоянной частоты с приводом постоянной скорости.

Для таких самолетов с основной энергосистемой постоянного тока напряжением 27 в, видимо, потребуется большое количество мощных преобразователей, что значительно увеличит вес и без того тяжелой системы постоянного тока в сравнении с энергосистемой переменного тока с приводом постоянной скорости.

Если нагрузка на канал (авиадвигатель) меньше 9—12 квт, то лучшей будет система постоянного тока напряжением 27 в. Эти преимущества особенно очевидны при использовании генератора в качестве стартера для запуска авиадвигателя.

Система эта проста и имеет в качестве резерва энергии аккумуляторы. Главный недостаток генератора постоянного тока устра-

няется при использовании бесконтактной конструкции. Для легких самолетов эта система, видимо, остается наиболее вероятной.

При большой потребности в тепловой мощности, вероятнее всего, подойдет энергосистема переменного тока 200/115 в нестабильной частоты. В этом случае постоянный ток получают от выпрямителей, а переменный ток постоянной частоты — от преобразователей. Решающее значение для применения энергосистемы нестабильной частоты имеет величина необходимой энергии постоянной частоты.

Таким образом, для каждого самолета существует свой оптимальный тип и мощность системы энергоснабжения.

По мере роста количества потребителей и необходимости передавать большие токи в высотных условиях нецелесообразно на самолетах применять в качестве основной энергосистемы постоянный ток низкого напряжения. Переход на постоянный ток более высокого напряжения ухудшает работу щеточно-коллекторного узла генератора и для больших высот может оказаться неприемлемым без специальных мер защиты. Многочисленные радиоустройства требуют широкой градации применяемых номинальных напряжений, а преобразование напряжений на постоянном токе значительно сложнее, чем на переменном. Все это заставляет для высотных самолетов с большой потребной электрической мощностью создавать основные системы электроснабжения на переменном токе.

Одновременно с первичной энергосистемой находят применение различные преобразователи, образующие так называемую систему вторичного питания, не менее ответственную, чем первичная. Использование преобразователей переменного тока в постоянный не может существенно повлиять на весовые и другие характеристики выбранной системы энергоснабжения. Использование же преобразователей постоянного тока в переменный связано с ухудшением надежности и увеличением веса энергетической системы.

§ 4. ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Считается, что развитие систем электроснабжения летательных аппаратов будет продолжаться в двух направлениях — с первичными энергосистемами переменного тока и с первичными энергосистемами постоянного тока. Однако в них неизбежно появление качественно новых источников электрической энергии.

Наиболее перспективные энергосистемы переменного тока такие, в которых при переменной скорости вращения первичного двигателя получают постоянную частоту без применения привода постоянной скорости, т. е. с помощью электромашинных и статических преобразователей.

На рис. 1.7 представлен один из вариантов принципиальной схемы для получения постоянной частоты переменного тока с помощью бесконтактной электромашинной системы. В качестве ис-

точника энергии здесь применен синхронный асинхронизированный генератор САГ, т. е. синхронный генератор, выполненный с многофазной обмоткой ротора, питающейся токами скольжения. В таких машинах магнитное поле, создаваемое обмоткой ротора, перемещается в сторону его вращения со скоростью скольжения так, что сумма механической скорости ротора и скорости вращения электрического поля относительно ротора всегда величина постоянная, равная синхронной скорости. На одном валу с ротором САГ находятся: ротор сигнал-генератора СГ, ротор генератора возбужде-

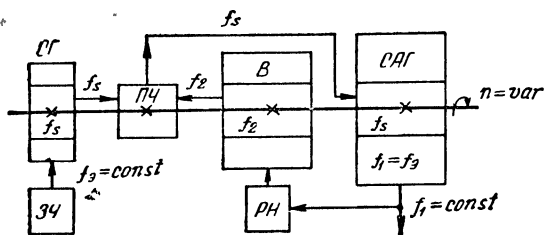


Рис. 1. 7. Принципиальная схема электромашиной системы переменного тока постоянной частоты

ния В и полупроводниковый преобразователь частоты ПЧ. Вал со всеми находящимися на нем элементами системы получает вращение от двигателя через обычный механический редуктор с переменной скоростью.

В системе предусмотрен маломощный задатчик частоты ЗЧ, генерирующий переменный ток эталонной частоты f_3 , равной, например, 400 гц. Эталонная частота подается в маломощный сигнал-генератор СГ, который путем сравнения собственной частоты с эталонной вырабатывает частоту скольжения f_s и подает ее в преобразователь частоты ПЧ.

Возбудитель В является генератором переменного тока нестабильной частоты f_2 и служит для возбуждения САГ. Мощность его зависит от диапазона скоростей вращения и может достигать до 60% мощности основного генератора.

Преобразователь частоты ПЧ, имея управляющий сигнал от СГ с частотой скольжения f_s , преобразует энергию переменного тока нестабильной частоты f_2 возбудителя в энергию переменного тока с частотой скольжения f_s и подает ее в многофазную обмотку ротора САГ. Со статора САГ выдается в сеть переменный ток постоянной частоты $f_1 = f_3 = 400$ гц. Напряжение регулируется путем воздействия на возбуждение возбудителя В с помощью регулятора напряжения РН.

Достоинством рассматриваемой электромашиной системы является бесконтактное конструктивное выполнение ее и сравнительно небольшой вес на единицу мощности.

К недостаткам следует отнести наличие на валу машины полупроводникового преобразователя на сравнительно большую мощность. Создание достаточно надежного преобразователя пока представляет большие трудности.

На рис. 1.8 представлен возможный вариант системы генерирования переменного тока постоянной частоты с помощью статического преобразователя.

Генератор Г получает переменную скорость вращения от авиадвигателя через обычный механический редуктор и выдает в сеть переменный ток повышенной нестабильной частоты от 3000 до

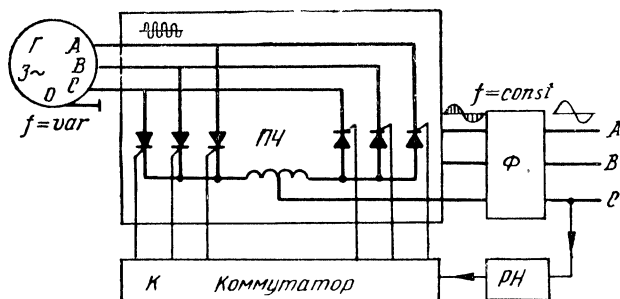


Рис. 1.8. Принципиальная схема статической системы генерирования переменного тока постоянной частоты

6000 гц, который поступает в преобразователь частоты ПЧ. На схеме показано преобразование частоты только одной фазы С. Преобразование в других фазах происходит аналогично.

Для получения одной фазы (например, фазы С) стабильной низкой частоты 400 гц применены шесть управляемых диодов: три для положительной и три для отрицательной полуволны. Коммутирующее устройство К управляет открыванием и закрыванием диодов, которые выпрямляют положительные и отрицательные полуволны высокой частоты. Это управление выполнено так, чтобы частота низкого напряжения (400 гц) была постоянной, при этом для обеспечения прохождения кривой низкого напряжения через нуль диоды в этой зоне должны работать в инверторном режиме.

Для уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения применяются схемы с 6- и 12-фазным выпрямлением отдельно по каждой фазе генератора.

Из ПЧ ток поступает в фильтр Ф. В результате получается переменный ток постоянной частоты с формой кривой, близкой к синусоиде. Напряжение регулируется воздействием на коммутирующее устройство К через регулятор напряжения РН.

Достоинство системы в том, что она выполнена бесконтактной, а преобразователь частоты может устанавливаться дистанционно

от авиадвигателя, т. е. в лучших температурных и вибрационных условиях. Это повышает надежность, увеличивает срок службы и упрощает условия эксплуатации.

Совершенствование электрических систем л. а. направлено на исключение перекидных контактов, трущихся контактных поверхностей и вообще всех подвижных частей.

Во всех рассмотренных энергосистемах имеется, по меньшей мере, одна главная подвижная часть — ротор. Поэтому будущее за использованием статических или непосредственных методов получения электроэнергии, где возможны три способа:

1. Непосредственное термоэлектрическое преобразование с использованием тепла выхлопных газов авиадвигателей или специальных генераторов тепла.

2. Электрохимическое (с применением топливных элементов), особенно если батарея будет работать на топливе авиадвигателя.

3. Ядерная реакция.

Общая особенность этих способов состоит в том, что они генерируют постоянный ток, а потребность в электроэнергии переменного тока должна будет, по-видимому, удовлетворяться каким-нибудь преобразователем.

Большим препятствием при конструировании электрических бортовых систем является так называемый «тепловой барьер». При полете со скоростью, соответствующей $M=2$ на высоте 18 300 м, условия охлаждения современных генераторов встречным воздушным потоком становятся предельными. Потребуется повышение рабочей температуры электрических машин или применения охлаждающих жидкостей. Для достижения более высокой рабочей температуры возрастает интерес к машинам такого типа, в которых обе обмотки (возбуждения и якоря) расположены на статоре, а ротор типа безобмоточного индуктора. Эти машины тяжелее обычных в $1,4 \div 1,6$ раза.

При скорости полета, соответствующей $M=3$, имеющиеся изоляционные материалы не пригодны для работы, так как их рабочая температура примерно 300°C .

При $M=2$ в неохлаждаемых отсеках кабели общего применения будут находиться в предельных условиях работы. При $M=3$ эти кабели не пригодны и требуется другая изоляция с неорганическими полимерами.

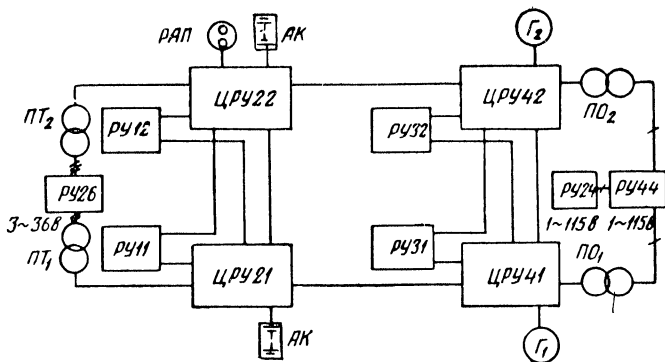
С повышением температуры повышается сопротивление проводника. При $M=3$ сопротивление медного проводника удваивается, что может привести к повышению напряжения системы, чтобы уменьшить вес кабелей.

Стремление выполнять функции регулирования, управления и защиты при низком уровне мощности уменьшает количество тепла, которое нужно отводить от аппаратуры. Это понижает рабочую температуру блока при данной температуре окружающей среды.

Электромеханические рёле, несмотря на ряд недостатков, обладают и очень полезным свойством благодаря наличию нескольких изолированных друг от друга контактных пар. Катушка удобно изолирована от контактов, в то время как транзисторы или управляемые выпрямители требуют дополнительных приспособлений для достижения необходимой изоляции.

ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С ОСНОВНОЙ СИСТЕМОЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

На рис. 2.1 и 2.2 представлены схемы энергоснабжения летательного аппарата, включающие первичную энергосистему постоянного тока напряжением 27 в и вторичные энергосистемы однофазного и трехфазного переменного тока.



В первичной энергосистеме основными источниками энергии служат стартер-генераторы, приводимые от авиадвигателей. Роль вспомогательных и аварийных источников энергии выполняют аккумуляторы.

В таких системах наиболее перспективным будет применение принципиальной схемы энергосистемы постоянного тока с кольцевой, многоканальной, защищенной питательной сетью, как обладающей повышенной надежностью и живучестью в нормальных и аварийных режимах работы. Система сохраняет работоспособность при чрезвычайной аварийной ситуации, когда происходит отказ всех генераторов. В этом случае автоматически обесточиваются все распределительные шины за исключением аварийных, с которых получают питание жизненно важные потребители, необходи-

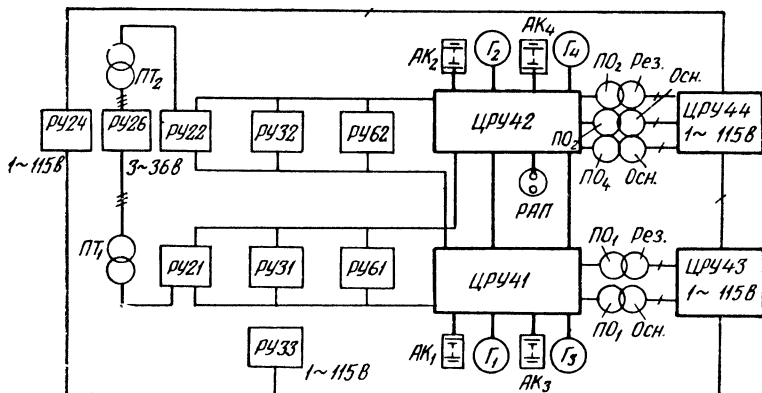


Рис. 2.2. Схема энергоснабжения летательного аппарата от четырех генераторов постоянного тока

мые для продолжения полета, если авиадвигатели работают, или совершения посадки при остановленных двигателях. Источниками энергии в таком положении служат только аккумуляторные батареи.

В наземных условиях бортовая сеть получает питание от аэродромного источника постоянного тока с помощью аэродромной розетки.

Стартер-генератор используется в качестве стартера для запуска авиадвигателя, получая питание от наземного источника или бортовых аккумуляторов.

Электропитание однофазным переменным током напряжением $115 \text{ в} \pm 5\%$ и частотой $400 \text{ гц} \pm 5\%$ осуществляется от вторичной энергосистемы, в которой источниками энергии являются два преобразователя типа ПО, один из которых работает, а второй находится в «холодном» резерве и автоматически подключается взамен вышедшего из строя. В схеме 2.2 пять преобразователей, из которых три основных и два резервных.

Электропитание трехфазным переменным током напряжением $36 \text{ в} \pm 5\%$ частотой $400 \text{ гц} \pm 2\%$ осуществляется от вторичной энергосистемы, в которой источниками энергии служат два преобразователя типа ПТ, один из которых работает, а второй находится

ся в «холодном» резерве и автоматически вступает в работу при отказе основного.

При отказе генераторов постоянного тока преобразователи ПО и ПТ переключаются на питание от аварийной сети и нагружаются только особо важными потребителями минимальной мощности.

§ 2. ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ОТ ГЕНЕРАТОРОВ ПОСТОЯННОГО И ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

На рис. 2.3 представлена схема энергоснабжения летательного аппарата от четырех основных генераторов постоянного тока и четырех вспомогательных генераторов переменного тока. Система состоит из первичной энергосистемы постоянного тока напряжением 27 в, первичной энергосистемы переменного тока и вторичных энергосистем однофазного и трехфазного переменного тока.

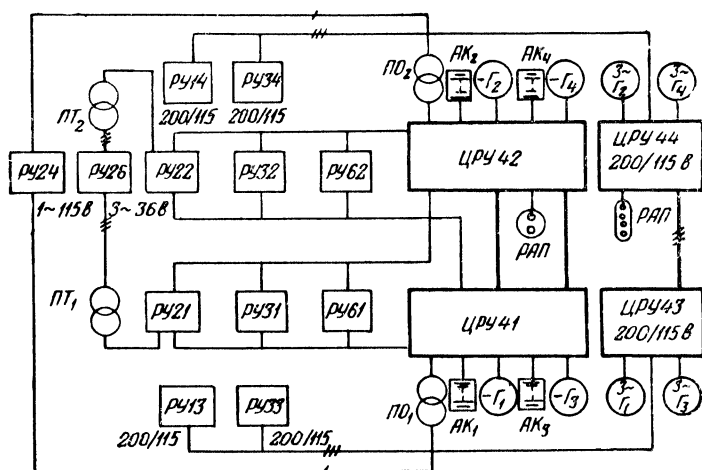


Рис. 2.3. Схема энергоснабжения летательного аппарата от генераторов постоянного и переменного тока

В первичной энергосистеме постоянного тока основными источниками энергии служат четыре стартер-генератора, приводимые от авиадвигателей. Роль вспомогательных источников энергии выполняют четыре аккумулятора. Система работает аналогично рассмотренным в § 1.

Первичная энергосистема переменного трехфазного тока нестабильной частоты напряжением 200/115 в используется для питания потребителей, безразличных к частоте. Источниками энергии служат четыре генератора, приводимые от авиадвигателей. Генераторы работают отдельно на соответствующую группу потребителей. При отказе отдельных генераторов важные потребители переключаются на питание от оставшихся.

Электропитание однофазным переменным током напряжением $115 \text{ в} \pm 5\%$ частотой $400 \text{ гц} \pm 5\%$ осуществляется от вторичной энергосистемы с двумя преобразователями типа ПО, из которых один работает, а второй находится в «холодном» резерве и автоматически подключается к сети при отказе основного.

Электропитание трехфазным переменным током напряжением $36 \text{ в} \pm 5\%$ частотой $400 \text{ гц} \pm 2\%$ обеспечивается вторичной энергосистемой с двумя преобразователями типа ПТ, из которых один работает, а второй находится в «холодном» резерве и автоматически подключается в сеть при отказе основного.

При отказе всех генераторов постоянного тока преобразователи ПО и ПТ переключаются на питание от аварийной сети и продолжают питать только ответственные потребители минимальной мощности.

Глава III

ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С ОСНОВНОЙ СИСТЕМОЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

§ 1. ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ОТ ГЕНЕРАТОРОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА НЕСТАБИЛЬНОЙ ЧАСТОТЫ

Система электропитания

Основной первичной энергосистемой является система трехфазного переменного тока напряжением $200/115 \text{ в}$ переменной частоты с двумя генераторами переменного тока.

Вторичной энергосистемой служит система постоянного тока напряжением 27 в , в которой источником энергии является трансформаторно-выпрямительный блок ТВБ.

Аварийное питание осуществляется от генератора переменного тока, приводимого от ветрянки, и от аккумулятора небольшой емкости.

Для работы на земле используется аэродромный источник энергии переменного тока, подключаемый через розетку аэродромного питания РАП. Система энергоснабжения приведена на рис. 3.1.

Система питания переменным током. Основными источниками питания бортсети переменного тока являются два трехфазных генератора, приводимые от двигателя.

Каждый генератор работает отдельно на определенную группу потребителей. При нормальной работе генератор G_1 питает шину Е, а генератор G_2 — шины Д и Ж.

Если какой-нибудь из генераторов будет вырабатывать ток повышенного или пониженного напряжения, то он автоматически отключается от шины и последняя подключается к исправному генератору, а в кабине летчика загорается сигнальная лампочка, указывающая, какой из генераторов не работает.

Шина Е питает ряд потребителей, включая трансформаторно-выпрямительный блок ТВБ₁.

Шина Д питает ряд потребителей в том числе трансформатор на 200/28 в, подводящий переменный ток напряжением 28 в к шине З, с которой получает питание светотехническое оборудование.

С аварийной шины Ж питание получают жизненно важные потребители: система закрылков, подкачивающий насос, система кондиционирования воздуха, освещение кабины, указатель положения и ТВБ₂.

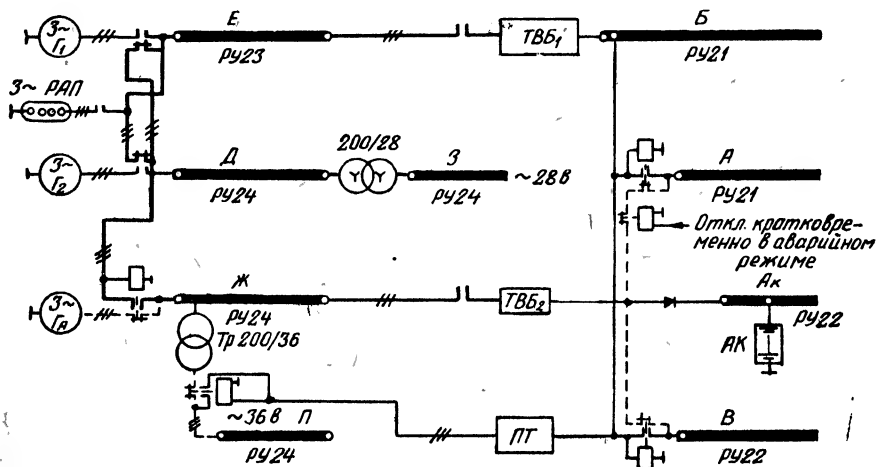


Рис. 3.1. Схема энергоснабжения летательного аппарата от двух генераторов переменного тока нестабильной частоты

В системе электропитания имеются реле минимальной частоты, отключающие шины от обоих генераторов переменного тока, если скорость вращения авиадвигателей падает ниже 65%. При этом прекращается работа всех потребителей электроэнергии, за исключением подкачивающего насоса, работающего при снижении скорости до 40%.

При отказе обоих генераторов аварийная шина Ж будет получать питание от аварийного генератора переменного тока, приводимого от ветрянки, которая в этом случае выдвигается в воздушный поток. От шины Ж через трансформатор аварийного питания приборов энергия подается на шину П приборов, с которой питаются компасная система и указатель положения.

При подключении аэродромного источника питания к бортсети генераторы автоматически отсоединяются от шин и все три шины переменного тока переключаются на питание от аэродромного источника. При этом защитные реле отключают преобразователь ПТ от главной шины постоянного тока (во избежание бесполезной его работы), а приборы автоматически переключаются на питание от ава-

рийной шины переменного тока через трансформатор аварийного питания приборов.

Система питания постоянным током. При нормальной работе трансформаторно-выпрямительный блок ТВБ₁, получающий питание с шины Е, преобразует переменный ток напряжением 200/115 в в постоянный ток напряжением 28 в и подает его на главную шину Б постоянного тока. От этой шины непосредственно питаются ряд потребителей, включая преобразователь питания приборов (ПТ).

При нормальной работе к главной шине Б подключены аварийная шина А и шина важных потребителей В, питающих агрегаты, обеспечивающие безопасность полета.

При нормальной работе трансформаторно-выпрямительный блок ТВБ₂, получающий питание от аварийной шины переменного тока Ж, подает постоянный ток напряжением 28 в на аккумуляторную шину Ак и аккумулятор, поддерживая его все время в полностью заряженном состоянии.

При отказе главной шины Б шины А и В автоматически переключаются на питание от трансформаторно-выпрямительного блока ТВБ₂.

При отказе основных генераторов аварийный генератор подает энергию к аварийной шине Ж, от которой питаются важные потребители, включая ТВБ₂.

Для предотвращения перегрузки аварийного генератора при включении потребителей механизации крыла (кратковременный режим) автоматически обесточивается шина А.

При отказе всех трех генераторов обесточиваются все шины переменного и постоянного тока за исключением шины аккумулятора Ак, которая в этом случае получает питание от аккумулятора. Блокировочный вентиль исключает возможность подачи энергии от аккумулятора к другим шинам, что необходимо для того, чтобы сохранить ограниченный запас энергии аккумулятора. С шины аккумулятора питаются системы сигнализации о пожаре и отказе генераторов, зажигание, перекрывные краны топлива и др.

Аккумулятор — единственный независимый источник постоянного тока в электросистеме. Управление аккумулятором полностью автоматизировано.

Система питания приборов. При нормальной работе пилотажные приборы питаются переменным током от преобразователя питания приборов. Преобразователь, подключенный к главной шине Б постоянного тока, преобразует постоянный ток напряжением 27 в в переменный ток напряжением 36 в частотой 400 гц и подает его на шину питания приборов П.

При отказе преобразователя шина П автоматически подключается через трансформатор Тр к аварийной шине переменного тока Ж, так что перерыва в работе приборов не произойдет. Шина П получает питание от шины Ж также и при включении бортовой сети на аэродромный источник.

Выводы

Система энергоснабжения надежно обеспечивает питанием потребители переменного и постоянного тока. Качество энергии по частоте наилучшее при номинальной скорости вращения авиадвигателя и сохраняется в допустимых пределах при небольшом диапазоне его скоростей.

Энергосистема нестабильной частоты с двумя генераторами обычно применяется на летательных аппаратах с одним и двумя авиадвигателями, имеющими небольшой диапазон скоростей вращения. Она с успехом может применяться на летательных аппаратах с несколькими двигателями, при этом надежность ее будет возрастать с увеличением числа двигателей, генераторов, ТВБ и ПТ.

§ 2. ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ПРИ РАЗДЕЛЬНОЙ РАБОТЕ ГЕНЕРАТОРОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПОСТОЯННОЙ ЧАСТОТЫ

Система электропитания

Основной первичной энергосистемой является система трехфазного переменного тока напряжением 200/115 в постоянной частотой 400 гц. Источниками энергии служат три генератора с приводом постоянной скорости, работающие раздельно на соответствующую группу потребителей.

Вторичной энергосистемой является система постоянного тока напряжением 27 в, источниками энергии в которой служат три трансформаторно-выпрямительных блока ТВБ.

Переменный ток напряжением 36 в получается из основного с помощью трансформаторов.

Аварийное питание переменным током осуществляется от генератора, установленного на вспомогательном автономном агрегате, который запускается в полете при отказе основных генераторов.

Сверхаварийное питание постоянным током осуществляется от аккумулятора, а переменным током — от статического преобразователя СП.

Наземное питание бортсети переменным и постоянным токами осуществляется от аэродромных источников энергии с помощью розеток РАП. Схема энергоснабжения приведена на рис. 3.2.

Система питания переменным током. Основной энергосистемой является система трехфазного переменного тока постоянной частоты, в которой в качестве источников энергии используются три генератора переменного тока, приводимые во вращение гидромеханическим приводом постоянной скорости. Для силовой нейтрали используется корпус самолета. Мощность однофазных нагрузок не превышает 5%, что позволяет сбалансировать загрузку фаз генераторов.

Привод постоянной скорости. На каждом двигателе смонтирован дифференциальный гидромеханический привод,

обеспечивающий постоянную скорость вращения генератора 8000 об/мин при изменении скорости двигателя в диапазоне 3300—6400 об/мин.

В установившихся режимах он обеспечивает стабилизацию частоты генератора с точностью $\pm 1\%$. При переходных процессах — изменении скорости вращения двигателя или нагрузки отклонения — частоты могут увеличиться до 5% .

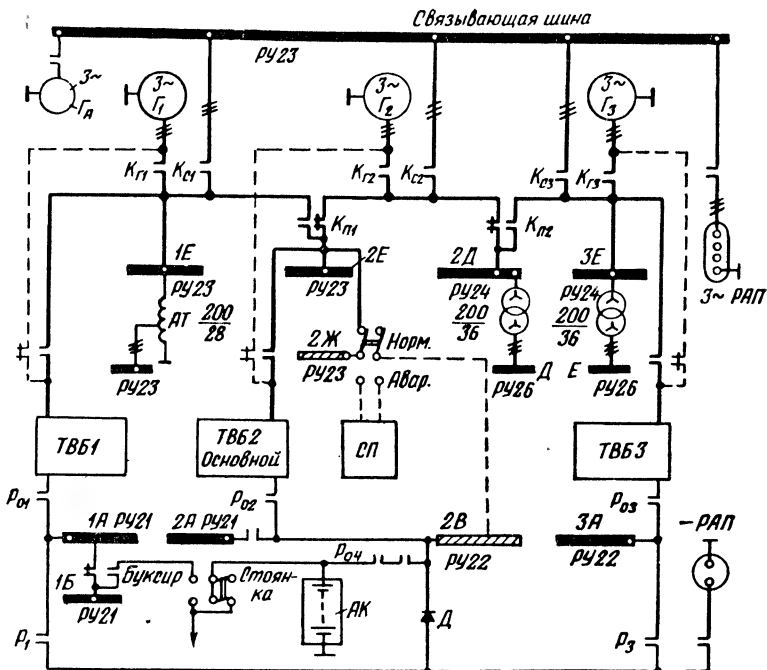


Рис. 3.2. Схема энергоснабжения летательного аппарата от трех генераторов переменного тока постоянной частоты

Основную мощность привод передает механическим путем. Максимальная величина мощности, передаваемая гидравлически, составляет не более 20%. При скорости двигателя, соответствующей крейсерскому режиму полета, насос гидропривода практически не нагружен.

Каждый привод независим и имеет свой маслбак, охладитель, приборы для измерения температуры и давления масла и защиту от перегрева. При повреждении генератора предусмотрено расцепление привода, причем в полете он не может быть снова включен.

Генератор переменного тока бесконтактный, имеет шестиполусную вращающуюся обмотку возбуждения с явно вы-

раженными полюсами, которая питается через выпрямитель от возбудителя.

В полете генератор охлаждается встречным потоком воздуха, на земле охлаждающий воздух поступает от компрессора двигателя.

Полную номинальную мощность генератор отдает при всех условиях, включая работу двигателя на земле при оборотах малого газа.

Генератор защищает от перегрева ртутный выключатель, смонтированный в статоре, который срабатывает при температуре выше 175°C .

Панель управления генератором. Каждый генератор имеет свою панель управления и обеспечивает регулирование напряжения и защиту, которая выполнена целиком из бесконтактных элементов. Регулятор напряжения в установившемся режиме поддерживает напряжение генератора 200 ± 4 в.

Панель обеспечивает защиту электросистемы от следующих аварийных режимов:

1. Защита от перенапряжения срабатывает, если напряжение превышает 215 в в течение времени большего 5 сек. Выдержка времени необходима, чтобы исключить ложное срабатывание защиты. Если после срабатывания защиты напряжение генератора восстанавливается до допустимых пределов, то он может быть повторно включен выключателем генератора, который в начале устанавливается в положение «Отключено», а затем «Включено».

2. Защита от понижения напряжения срабатывает, если напряжение генератора понижается до 185 в в течение 5 сек. Предусмотрено повторное подключение генератора к сети, когда напряжение его повысится до 186—195 в.

3. Защита от повышения частоты отключает генератор от сети при частоте 420—424 гц в течение 1 сек. Возможно повторно подключить генератор к сети, если частота понизится до 418—406 гц.

4. Защита от понижения частоты срабатывает, когда частота $360 \div 376$ гц. При повышении частоты до 382—394 гц можно повторно включить генератор.

5. Защита от коротких замыканий и обрыва фаз построена по принципу сравнения несбалансированного тока, протекающего в панели управления, с несбалансированным напряжением.

Обеспечена защита от коротких замыканий только фидера генератора до панели управления. Первичная питательная сеть (до распределительных шин) защиты не имеет. Провода первичной питательной сети смонтированы так, чтобы полностью исключить возможность коротких замыканий.

6. Защита от неправильной последовательности фаз.

7. Защита от перевозбуждения и недовозбуждения генератора.

Аварийный источник переменного тока представляет собой небольшой реактивный двигатель, на котором установлен генератор переменного тока.

В наземных условиях при отсутствии аэродромных источников питания воздухом и электроэнергией агрегат питает системы кондиционирования и запуска двигателей воздухом, а бортовую сеть — электроэнергией.

Статический преобразователь. На самолете устанавливается статический преобразователь постоянного тока в переменный, который используется для питания аварийных приборов: авиагоризонта, указателя поворота и скольжения и некоторых радионавигационных приборов. Он также обеспечивает электропитанием систему заправки самолета топливом, что позволяет заправлять самолет с использованием только самолетной аккумуляторной батареи.

Распределение электроэнергии переменного тока. Генераторы переменного тока основной энергосистемы работают раздельно каждый на свою нагрузку. При нормальной работе генератор G_1 питает шину переменного тока 1Е, генератор G_2 — шины 2Е, 2Д и аварийную шину 2Ж, к которой подключены жизненно важные потребители, необходимые для завершения полета в аварийном случае, и генератор G_3 — шину 3Е.

Шина генератора G_2 разделена на две части — 2Е и 2Д — с тем, чтобы при выходе из строя одного генератора распределить всю нагрузку между двумя оставшимися генераторами поровну. Важные дублирующие потребители электроэнергии разделены между шинами 1Е и 3Е.

В аварийных случаях нагрузки переключаются следующим образом. При повреждении генератора G_1 — выключается контактор $K_{Г1}$ и генератор отключается от сети. Одновременно срабатывают контакторы $K_{с1}$ и $K_{с2}$ и переключающий контактор $K_{П2}$. Шина 1Е подключается к генератору G_2 , а шина 2Д переключится на питание от генератора G_3 .

При повреждении генератора G_2 выключается контактор $K_{Г2}$ и переключаются контакторы $K_{П1}$ и $K_{П2}$. При этом шина 2Е подключается к генератору G_1 , а шина 2Д — к генератору G_3 .

При выходе из строя генератора G_3 выключается контактор $K_{Г3}$, включаются контакторы $K_{с2}$ и $K_{с3}$ и переключается контактор $K_{П1}$. Шина 3Е оказывается подключенной к генератору G_2 , а шина 2Е переключается на питание от генератора G_1 .

При отказе двух любых генераторов шины 1Е и 2Е или 2Д и 3Е обеспечиваются питание переменным током. Питание аварийной шины переменного тока Ж обеспечивается либо от шины 2Е, либо от статического преобразователя. Нагрузка между шинами распределена так, что при выходе из строя двух генераторов самолет может продолжать полет в любых условиях.

При подключении аэродромного источника питания переменным током связывающие контакторы $K_{с1}$, $K_{с2}$ и $K_{с3}$ срабатывают и обеспечивают питанием все шины переменного тока. Предусмотрен контроль за частотой, напряжением и последовательностью фаз аэродромного источника питания переменного тока. Аэродромный

источник подключается к бортсети только в том случае, если все указанные параметры будут находиться в допустимых пределах.

При запуске основных двигателей связывающие контакторы автоматически выключаются, а генераторы подключаются на питание собственных шин.

Аварийный источник питания переменного тока подключается к сети так же, как и аэродромный источник питания. Имеется блокировка, не допускающая параллельной работы аэродромного и аварийного источников питания. В этом случае к сети подключается только аварийный источник питания. Блокировка также не допускает параллельную работу основных генераторов и аварийного источника питания. При этом преимущество отдается основным генераторам.

При отказе автоматической системы переключения переменного тока предусмотрено ручное с помощью трех переключателей. При выходе из строя какого-либо привода постоянной скорости или генератора загорается соответствующая сигнальная лампочка, информирующая экипаж о повреждении и указывающая, какой переключатель необходимо использовать для переключения шин. Переключатели смонтированы так, что одновременно невозможно переключить более одного переключателя.

Длительная нагрузка каждого генератора практически не превышает 50% номинальной мощности генератора. Поэтому при выходе из строя одного генератора, оставшиеся два генератора полностью обеспечивают питанием все нагрузки. При выходе из строя двух генераторов часть нагрузок отключается схемой переключения шин. Кратковременная 5-минутная нагрузка обеспечивается за счет перегрузочной способности генератора.

Система питания постоянным током напряжением 27 в является вспомогательной, (вторичной) энергосистемой, в которой источниками энергии служат три трансформаторно-выпрямительных блока ТВБ по 3 квт каждый. Постоянный ток в основном используется для питания радиооборудования, контакторов, реле, лампочек сигнализации и т. п. Несмотря на большое количество электроцепей постоянного тока, отношение потребляемой мощности постоянного тока к потребляемой мощности переменного тока равно приблизительно 1 : 10.

Номинальная нагрузка блока 110 а. Два блока могут работать параллельно и питать длительно нагрузку 160 а.

При номинальной работе шины 1А, 2А и 3А постоянного тока питаются каждая от своего ТВБ. Блоки 1 и 3 могут работать параллельно. Основным является блок 2, так как от него питается аварийная шина постоянного тока 2В, к которой подключены жизненно важные потребители электроэнергии. В цепи блока 2 имеется блокировочный диод Д, который разрешает питание шины 2А и аварийной шины 2В от блоков 1 и 3, не допуская питания шин 1А и 3А от блока 2.

При выходе из строя одного блока все шины могут питаться от оставшихся двух.

В фидере каждого ТВБ установлено реле обратного тока P_0 , которое при коротком замыкании на выходной стороне блока отключает его от сети. Реле обратного тока, предусмотренное в фидере аккумуляторной батареи, при коротком замыкании на клеммах и внутри батареи отключает ее от сети.

Имеется розетка для подключения к бортсети источника аэродромного питания постоянного тока, который обеспечивает питанием все потребители постоянного тока.

Установлен дополнительный выключатель «Стоянка—Буксировка», подающий от аккумулятора питание на некоторые потребители: связь, манометр давления тормозной системы и навигационное освещение малой интенсивности. При стоянке питается только навигационное освещение малой интенсивности света.

Аварийное питание постоянным током. В качестве аварийного источника энергии постоянного тока служит свинцовоокислотная аккумуляторная батарея емкостью 25 а. ч. При выходе из строя всех трех генераторов переменного тока аккумуляторная батарея обеспечивает питанием: связь, навигационные приборы, освещение приборной доски пилота, освещение пассажирской кабины и статический преобразователь, который питает аварийные приборы переменного тока. Батарея питает аварийные нагрузки в течение 30 мин. Она также обеспечивает три запуска аварийного агрегата питания при нормальных атмосферных условиях. В наземных условиях батарея может длительно заряжаться от аварийного агрегата питания или аэродромного источника питания переменного тока через трансформаторно-выпрямительный блок.

§ 3. ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЕ ГЕНЕРАТОРОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПОСТОЯННОЙ ЧАСТОТЫ

Системы электропитания

Система электроснабжения состоит из первичной энергосистемы переменного тока напряжением 200/115 в постоянной частоты 400 гц $\pm 1\%$, вторичной энергосистемы постоянного тока напряжением 27 в.

Основными источниками электроэнергии являются четыре генератора трехфазного переменного тока мощностью по 40 ква, которые приводятся от авиадвигателей через приводы постоянной скорости.

Приводы генераторов постоянной скорости — независимые гидромеханические системы.

Постоянный ток напряжением 27 в получается из переменного с помощью четырех трансформаторно-выпрямительных блоков мощностью по 1,5 квт. Аккумуляторная батарея емкостью 36 а. ч.

обеспечивает энергией постоянного тока некоторые управляющие элементы при начальном включении энергосистем, а также питает жизненно важные потребители в свержаварийном режиме полета.

Вся энергия переменного тока распределяется через центральное распределительное устройство непосредственно по потребителям и вторичным распределительным устройствам, смонтированным в кабине экипажа.

Наземное питание осуществляется трехфазным переменным током от аэродвигательного источника. Общая схема системы энергоснабжения показана на рис. 3.3.

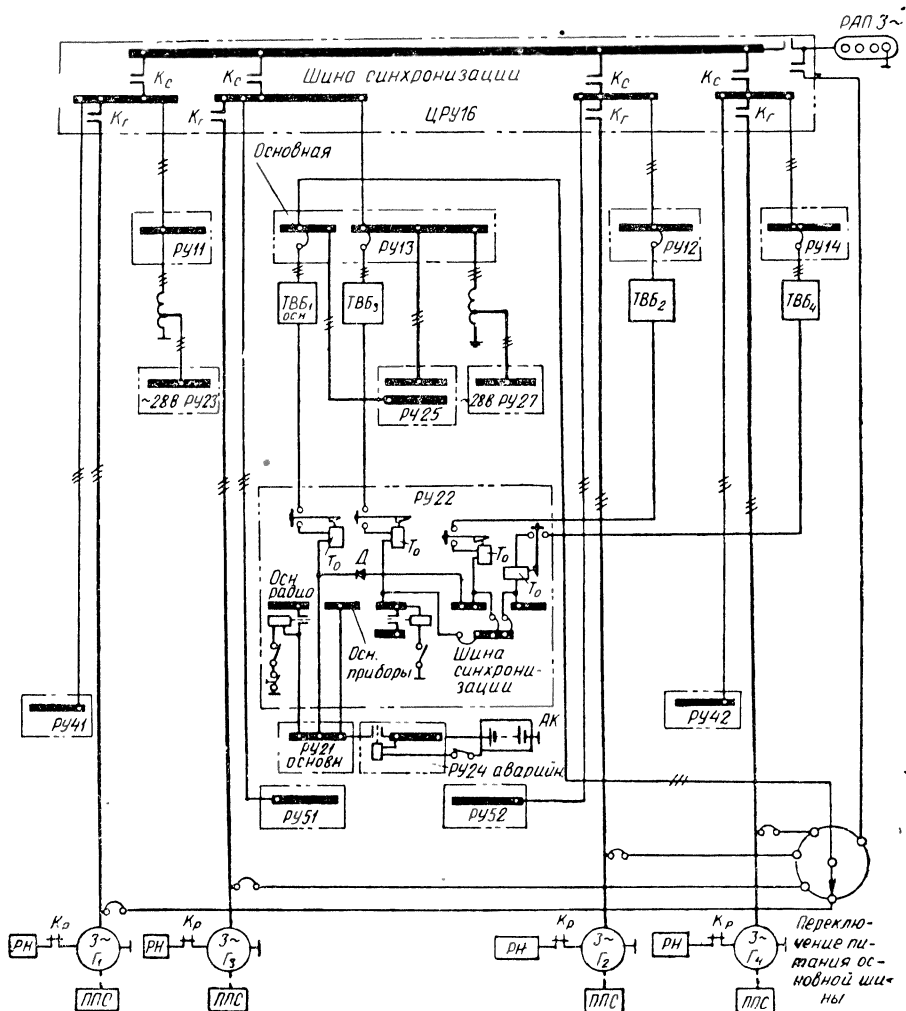


Рис. 3.3. Схема электроснабжения летательного аппарата от четырех генераторов переменного тока постоянной частоты

Система переменного тока — основная энергосистема, обеспечивающая питанием все потребители, включая потребители, необходимые для безопасности самолета и экипажа. Источниками энергии служат четыре бесконтактных генератора, каждый из которых имеет свои системы управления и защиты. Нормально генераторы работают параллельно, снабжая трехфазным переменным током все потребители одновременно. Однако нагрузки распределяются так, чтобы каждый генератор снабжал свою собственную индивидуальную шину, изолированную от других генераторов, которые могут в это время работать параллельно или раздельно.

Энергия от генераторов подается к соответствующим генераторным шинам в центральное распределительное устройство (ЦРУ 16), которое является первичным распределительным пунктом в системе. В ЦРУ расположены основные шины, контакторы включения генераторов, контакторы шины синхронизации, контакторы аэродромного питания и другая аппаратура, предназначенная для управления и защиты (трансформаторы тока и реле). Контактторы генераторов K_g подключают генераторы к основным шинам, а контакторы K_c включают их на параллельную работу.

Энергия от основных шин ЦРУ передается непосредственно к некоторым потребителям и ко вторичным распределительным устройствам РУ, расположенным в кабине экипажа и других отсеках самолета. Одна часть энергии от вторичных распределительных устройств передается непосредственно к трехфазным и однофазным потребителям, другая понижается трансформаторами до напряжения 28 в и используется для освещения. Часть переменного тока трансформаторно-выпрямительными блоками преобразуется в постоянный ток напряжением 28 в и используется для питания потребителей постоянного тока.

На основную шину переменного тока, расположенную в РУ13, энергия подается непосредственно от выхода генератора независимо от системы нормального распределения. Для снабжения энергией основной шины может быть выбран любой генератор или аэродромный источник электроэнергии.

Генераторами можно управлять вручную выключателями с пульта управления из кабины экипажа, при этом включаются соответствующие автоматические устройства переменного тока. Каждому генератору соответствует три выключателя. Выключатель «Управление генератора» управляет действием реле (K_p), которое соединяет обмотку возбуждения генератора с регулятором напряжения. Выключатель «Контактор синхронизации» управляет действием контактора синхронизации K_c , который нормально включен. Выключатель «Контактор генератора» управляет действием контактора генератора K_g .

Так как контакторы синхронизации нормально включены, то при включении любого выключателя «Контактор генератора» энергия подводится ко всем четырем шинам ЦРУ. Контактторы при включении автоматически переводят генераторы на параллельную

работу. Все три выключателя для каждого генератора с тремя положениями удерживаются в среднем положении «Выключено» пружинами. Когда выключатель ставится в положение «Включено» или «Отключено», срабатывает соответствующий ему контактор или реле. Действительное положение контакторов или реле показывается сигнальной лампочкой «Цепь разомкнута» для контакторов генератора и синхронизации и сигнальной лампочкой «Выключено» для реле управления генератора.

Аэродромный источник переменного тока через розетку, контактор аэродромного питания и контакторы синхронизации подключается к распределительным шинам генераторов. Схемой исключается возможность параллельной работы аэродромного источника с генераторами. Все четыре контактора генераторов автоматически размыкаются перед включением контактора аэродромного питания. Включение любого контактора генератора автоматически размыкает контактор аэродромного питания. Выключатель аэродромного питания имеет три положения «Включено», «Отключено» и «Аэродромное обслуживание». В последнем случае энергия подается только для обслуживания самолета и не поступает на основные шины.

Генератор переменного тока — бесконтактный, трехфазный, мощностью 40 *кв*а с силовой нейтралью и вращающейся обмоткой возбуждения. Возбуждается генератор от возбудителя переменного тока через трехфазный двухполупериодный выпрямитель, расположенный в валу ротора генератора.

Охлаждается генератор потоком воздуха, создаваемым компрессором авиадвигателя. В станину основного генератора вмонтирован термовыключатель.

Автоматическое управление и защита системы переменного тока выполняются отдельными для каждого генератора панелями управления. При включении выключателей генератора панель автоматически выдает сигналы на контакторы генераторов, реле управления и контакторы параллельной работы. Каждая панель автоматически защищает соответствующую систему генератора либо изолируя ее, если генератор работает параллельно с другими генераторами, либо отключая генератор. Блокирующие реле в панели, которые предохраняют реле управления генератора и контактор параллельной работы от замыкания, должны срабатывать только при наличии неисправностей.

Привод постоянной скорости является независимой гидромеханической системой и в случае неисправности отсоединяется от авиадвигателя.

Энергосистема постоянного тока напряжением 27 в используется для питания реле и контакторов управления, различных сигнализаторов, электрокранов и других потребителей.

Источниками энергии служат четыре нерегулируемых трансформаторно-выпрямительных блока (ТВБ) мощностью по 1,5 *квт*.

Блоки 2, 3 и 4 работают параллельно через специальную синхронизирующую шину. Основной блок 1 работает только на свои собственные шины. Три остальных блока через блокировочный диод Д при необходимости подпитывают фидер основного блока 1, что особенно важно при отказе последнего.

Реле обратного тока T_0 предохраняют от возможности перехода энергии в неисправный ТВБ от исправных.

Все ТВБ запитываются с определенных шин переменного тока. Основной блок 1 может получать питание непосредственно с клемм любого генератора или аэродромного источника при установке переключателя в соответствующее положение; переключение осуществляется специальным переключателем.

В системе предусмотрена аккумуляторная батарея на 36 а. ч. Аккумуляторная батарея может заряжаться от основного блока 1 и от остальных через диод Д.

При отказе всех ТВБ аккумулятор питает основную шину, обеспечивая энергией постоянного тока потребители, необходимые для управляющих функций.

В системе предусматриваются двухполупериодные выпрямители, включенные по фазам на напряжение 115 в. Эта энергия постоянного тока используется для питания штепсельных розеток, расположенных в туалетных комнатах и в кабине пилотов.

§ 4. ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ОТ ДВУХ АВТОНОМНЫХ СИСТЕМ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПОСТОЯННОЙ ЧАСТОТЫ

Вся система энергоснабжения разделена на две самостоятельные электрические системы А и В, которые в нормальных условиях работают совершенно изолированно друг от друга. Схемы систем энергоснабжения представлены на рис. 3.4 и 3.5.

Основной первичной энергосистемой является система трехфазного переменного тока напряжением 200/115 в постоянной частотой 400 гц. Источниками энергии служат четыре бесконтактных генератора переменного тока, получающие вращение от гидромеханических приводов постоянной скорости.

Как правило, системы переменного тока работают отдельно, однако возможно их объединение специальным контактором К, чтобы исключить перегрузку генератора при отказе одного из двух параллельно работающих.

Энергия от генераторов подводится к главным распределительным шинам, с которых получают питание непосредственно некоторые потребители и вторичные распределительные шины. Вторичные шины запитываются по одноканальной радиальной защищенной системе, обеспечивающей необходимую надежность при условии малых длин и хорошей защиты питающих линий от повреждений.

Для увеличения надежности применено секционирование вторичных шин, которые питаются по самостоятельным каналам от различных первичных шин.

В целях разгрузки выпрямительных блоков для питания части потребителей используется низкое напряжение переменного тока, снимаемое с автотрансформаторов 200 / 28 в.

Для обеспечения полета самолета при отказе всех четырех двигателей предусмотрен аварийный турбогенератор, работающий от

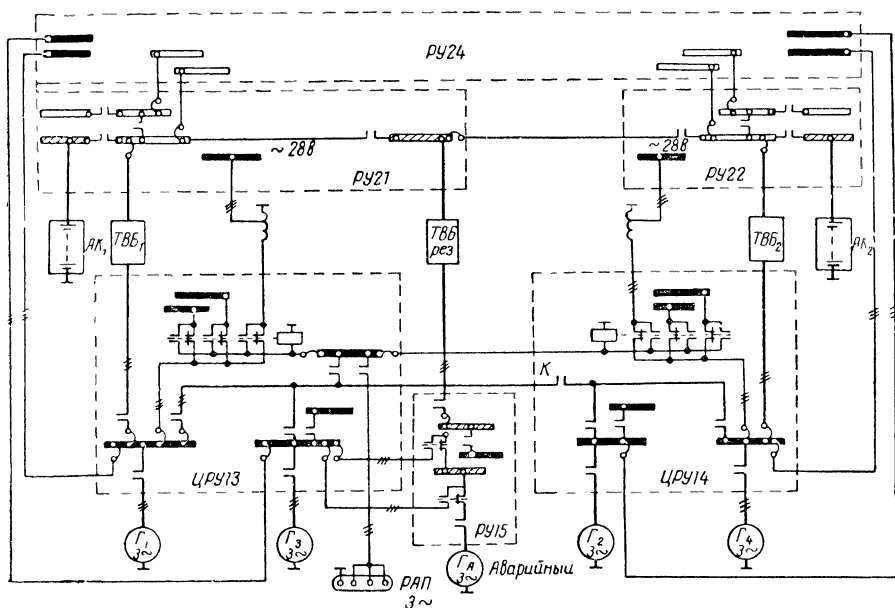


Рис. 3.4. Схема энергоснабжения летательного аппарата от двух автономных систем переменного тока постоянной частоты

ветрянки. В этом случае энергия переменного тока используется только для питания жизненно важных агрегатов и резервного трансформаторно-выпрямительного блока (ТБВ).

Вторичной энергосистемой служит система постоянного тока напряжением 27 в, в которой источниками энергии являются два трансформаторно-выпрямительных блока (ТБВ).

Энергосистемы постоянного тока также образуют две автономные системы, в каждой из которых работают параллельно выпрямительный блок и аккумулятор.

Предусмотрен резервный выпрямительный блок, который может быть использован для замены любого вышедшего из строя. Резервный блок является основным источником постоянного тока при работе аварийного турбогенератора переменного тока. При от-

казе последнего источниками энергии остаются только аккумуляторные батареи, питающие особо ответственные потребители, необходимые для непродолжительного полета и посадки.

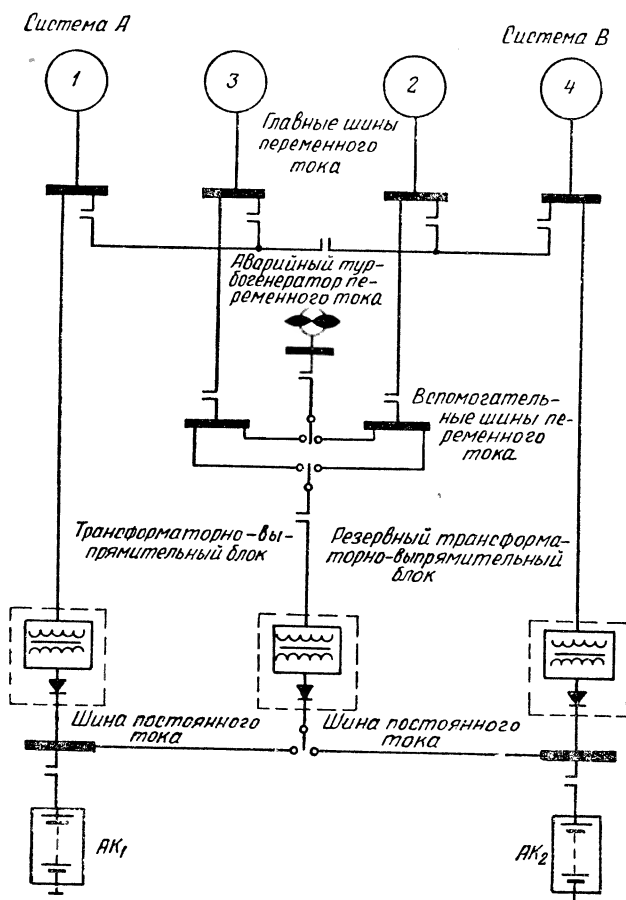


Рис. 3.5. Принципиальная схема распределения электроэнергии

Питание от наземного источника предусматривается только трехфазным переменным током.

§ 5. ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ПРИ КОМБИНИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ ВКЛЮЧЕНИЯ ГЕНЕРАТОРОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПОСТОЯННОЙ ЧАСТОТЫ

Система электропитания

Система энергоснабжения состоит из первичной энергосистемы трехфазного переменного тока напряжением 200/115 в постоянной

частотой $400 \pm 1\%$ и вторичной энергосистемы постоянного тока напряжением 27 в.

Основными источниками энергии служат четыре бесконтактных генератора трехфазного переменного тока, получающие вращение от приводов постоянной скорости, которые являются независимыми пневмомеханическими системами.

Источниками энергии постоянного тока напряжением 28 в являются четыре трансформаторно-выпрямительных блока (ТВБ).

Вспомогательными источниками постоянного тока служат четыре аккумулятора, которые обеспечивают запуск турбоагрегата, питание управляющих элементов в определенные периоды и являются аварийными источниками при отказе всех четырех генераторов переменного тока.

Вся энергия переменного тока распределяется через главные шины двух центральных распределительных устройств ЦРУ43 и ЦРУ44. С главных шин получают питание некоторые потребители непосредственно и вторичные распределительные устройства, размещенные в кабинах экипажа и других отсеках, где сосредоточены определенные группы потребителей.

В системе предусмотрено наземное питание трехфазным переменным и постоянным токами.

Общая схема системы энергоснабжения самолета показана на рис. 3.6.

Энергосистема переменного тока. Генераторы нормально работают параллельно, объединяясь через шину синхронизации, и питают переменным током все потребители. Однако нагрузки распределяются таким образом, чтобы каждый генератор мог снабжать свою собственную главную шину, изолированную от других генераторов.

Энергосистема предусматривает три режима работы:

1. Параллельную работу четырех генераторов.
2. Раздельную работу двух групп с параллельной работой двух генераторов в каждой группе.
3. Раздельную работу генераторов на соответствующую группу потребителей.

Энергия от генераторов подается к главным распределительным шинам генераторов в центральные распределительные устройства ЦРУ43 и ЦРУ44, которые являются первичными распределительными пунктами в системе. В ЦРУ расположены главные шины, шины синхронизации, контакторы включения генераторов, аэродромного питания и аварийного генератора и другая аппаратура, предназначенная для управления и защиты.

Энергия от главных шин ЦРУ передается ко вторичным распределительным устройствам РУ и непосредственно к ряду потребителей.

Вторичные распределительные шины запитываются радиально от соответствующих первичных шин по трем каналам с двусторонней защитой.

Часть энергии переменного тока подается к трехфазным и однофазным потребителям без всяких изменений. Часть энергии преобразуется трехфазными трансформаторами в пониженное напряжение 36 в, и автотрансформаторами в напряжение 28 в и ниже. Некоторая доля переменного тока преобразуется в постоянный напряжением 28 в с помощью трансформаторно-выпрямительных блоков.

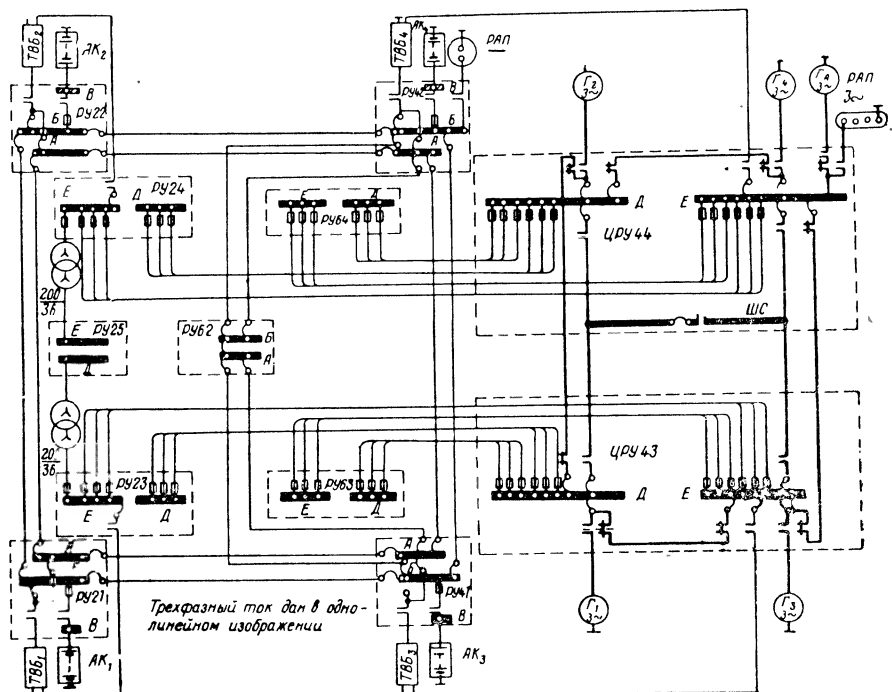


Рис. 3.6. Схема энергоснабжения летательного аппарата при комбинированной системе включения генераторов переменного тока постоянной частоты

При раздельной работе каждый генератор питает определенную группу потребителей и загружен не более 0,5 номинальной мощности. Поврежденный генератор автоматически отключается от сети, а его потребители также автоматически переключаются на исправный, причем последний нагружается только до номинальной мощности.

Управлять каждым генератором вручную можно при помощи двух выключателей. Один из них включает генератор на параллельную или раздельную работу. Один общий переключатель на все четыре генератора позволяет задавать режимы параллельной работы всех четырех или по два в группе.

Автоматическое управление и защита системы переменного тока выполняется соответствующими блоками, раздельными для каждого генератора.

Аэродромное питание осуществляется переменным током. Специальная блокировка исключает возможность параллельной работы генераторов с аэродромным источником.

Энергосистема постоянного тока напряжением 27 в применяется для питания цепей управления, маломощных электродвигателей, электрокранов, приборов, сигнализации и отдельных фидеров освещения.

Источниками энергии служат четыре нерегулируемых трансформаторно-выпрямительных блока (ТВБ). Блоки работают параллельно на общее двухканальное энергетическое кольцо. При равномерном распределении нагрузки по шинам каждый выпрямитель работает на собственные шины ЦРУ, а в соединительных проводах между ЦРУ течет незначительный уравнительный ток, возрастающий только при отказе какого-либо блока. Вторичные распределительные устройства запитываются по четырехканальной кольцевой схеме с двусторонней защитой проводов.

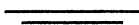
Реле обратного тока отключают ТВБ от сети при его повреждении.

В системе предусмотрено четыре аккумуляторных батареи, которые в полете могут заряжаться от сети.

При отказе выпрямителей аккумуляторы питают собственные шины В, с которых получают энергию некоторые основные потребители, необходимые для управляющих и пилотажных функций.

Два ТВБ запитываются от первичных распределительных устройств, а два других — от вторичных РУ.

Разделение энергосистемы постоянного тока на две автономные на схеме не показано, но оно может быть выполнено контакторами, как показано на рис. 2.17 шестого раздела.



ПРИЛОЖЕНИЕ

ПРИМЕР РАЗРАБОТКИ ЭСКИЗНОГО ПРОЕКТА ПАССАЖИРСКОГО САМОЛЕТА

В качестве примера рассматривается разработка эскизного проекта по электрооборудованию пассажирского самолета среднего веса.

Разработка эскизного проекта начинается с рассмотрения требований заказчика, выбора оборудования и определения потребителей электрической энергии.

Потребители группируются по функциям и заносятся в таблицу, возможный вариант которой показан в табл. 1. Мощности потребителей проставляются в соответствующих графах в зависимости от продолжительности работы и требуемого рода тока.

Потребители малой мощности в таблицу не вносятся за исключением тех, которые требуют повышенной точности напряжения или частоты.

По данным таблицы выявляются соотношения мощностей по роду тока, напряжению и частоте, определяются первичная и вторичные энергосистемы, устанавливаются мощности и количество источников энергии и строятся графики нагрузок.

В рассматриваемом примере согласно соотношению мощностей потребителей по роду тока учтя преимущества применения электрических стартеров для запуска авиадвигателей, за первичную энергосистему целесообразно принять энергосистему постоянного тока с комплексом вторичных энергосистем однофазного и трехфазного переменного тока.

В соответствии с этим разрабатываются принципиальные электросхемы энергосистем и потребителей по функциям.

Если в начальной стадии проектирования не очевидны преимущества применения определенного рода тока в качестве основного, то целесообразно разрабатывать параллельно две энергосистемы с первичным постоянным и переменным токами с тем, чтобы при разработке принципиальных схем потребителей уточнить эксплуатационные и весовые характеристики и окончательно выбрать лучший вариант электроснабжения.

Техническая документация оформляется в соответствии с рассмотренными выше принципами.

На рис. 1 приведена принципиальная схема первичной энергосистемы постоянного тока, основными источниками в которой являются четыре стартер-генератора мощностью по 12 кВт и вспомогательными — две аккумуляторных батареи емкостью по 30 а. ч.

Источники энергии выбраны из условия максимально возможной мощности одновременно включенных потребителей с учетом необходимого резерва.

Генераторы и аппаратура показаны только для левого борта с раскрытием внутренних схем для одного комплекта.

Фидеры потребителей в распределительных устройствах сгруппированы по функциям. Защита не показана, но даны истинные величины потребляемого тока. Кратковременные нагрузки отмечены индексом «к».

Наличие истинных токов позволяет легко определить сечения проводов, питающих шин распределительных устройств, выбрать тип и номинальную величину защиты. Рядом с наименованием провода указываются исходные и расчетные данные: длина, сечение, величина проходящего тока при наиболее тяжелом режиме и потеря напряжения в данном проводе.

Нумерация агрегатов выполнена в соответствии с функциональной принадлежностью в интервале от 100 до 199. Цифра в знаменателе номера агрегата указывает отсек (пульт), в котором он установлен.

Для упрощения нумерация проводов на рис. 1 не показана и выполняется при рабочем проектировании по изложенным ранее правилам.

Наличие схемы размещения агрегатов, ЦРУ, РУ и коммуникаций проводов дает полное представление о компоновке энергосистемы на самолете.

Наличие таблицы с указанием веса агрегатов, конструкции и проводов позволяет определить установленный и полетный вес энергосистемы.

В шестом * разделе на рис. 1.9 показана принципиальная схема вторичной энергосистемы однофазного переменного тока, источниками энергии в которой являются два преобразователя типа ПО мощностью по 1500 ва. Один из них работает, а второй находится в «холодном резерве» и автоматически подключается при выходе основного из строя.

В шестом * разделе на рис. 1.12 показана принципиальная схема вторичной энергосистемы трехфазного переменного тока, источниками энергии в которой являются два преобразователя типа ПТ мощностью по 750 ва. Один из них работает, а второй находится в «холодном резерве» и автоматически подключается при выходе основного из строя.

* Для эскизного проекта указанные схемы должны быть дополнены техническими данными, как показано на рис. 1.

Таблица 1

[illegible]

7	Тепловые системы	1	Механизмы на- дува кабины	81					2	1	162																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								</
---	------------------	---	------------------------------	----	--	--	--	--	---	---	-----	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	----

[illegible]

[illegible]

На рис. 2 показана принципиальная электросхема управления самолетом. Принципиальные электросхемы потребителей по другим функциям выполняются аналогично.

При разработке принципиальных электросхем уточняются мощности и режимы работы потребителей по этапам полета. Окончательные данные о потребителях заносятся в таблицы, по которым уточняются графики нагрузок источников энергии. Таблицы и графики составляются отдельно для каждого рода тока.

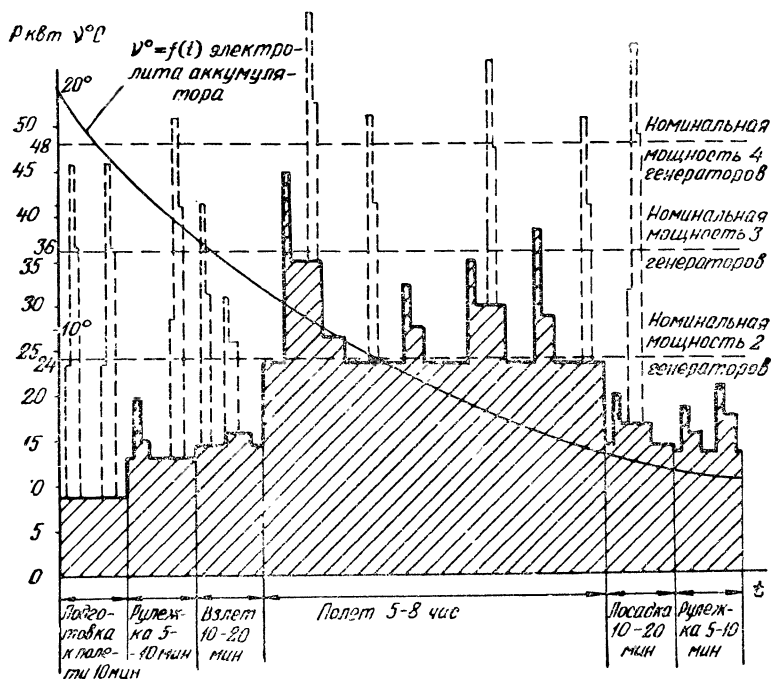


Рис. 3. График нагрузок источников постоянного тока

В качестве примера для потребителей постоянного тока всего самолета составлена табл. 2 и соответственно построен график нагрузок, показанный на рис. 3. На графике отражены нагрузки, общие для всего самолета. Аналогично составляются таблицы и строятся графики нагрузок отдельно для каждой шины и распределительного устройства.

На основании графика нагрузок по наиболее тяжелому режиму определяется максимальная мощность одновременно включенных потребителей. Наиболее тяжелый режим полета с точки зрения величины нагрузки для каждого конкретного самолета устанавливается на основании тщательного анализа характера работы потребителей. Для пассажирского самолета это будет ночной полет при

Таблица потребителей электрической энергии постоянного тока

Функции	Потребители		Мощность одного потребителя, вт	Число потребителей	Коэффициент одновременности	Суммарная мощность одновременно работающих потребителей по этапам полета в вт											
	№	Наименование				Подготовка к полету		Рулежка		Взлет		Полет		Посадка		Рулежка	
						до 5 сек	до 5 мин	длительность	до 5 сек	до 5 мин	длительность	до 5 сек	до 5 мин	длительность	до 5 сек	до 5 мин	длительность
1	Энергетика постоянного тока	№	Наименование	Мощность одного потребителя, вт	Число потребителей	Коэффициент одновременности											
1	Преобразователь ПО-1500	2800	20,5					2800						2800			2800
2	Преобразователь ПТ-750	1670	20,5					1670						1670			1670
...	...																
...	...																
	Итого													7000			6000
																	5000
5	Двигательные системы	№	Наименование	Мощность одного потребителя, вт	Число потребителей	Коэффициент одновременности											
1	Расходомер	5	21					10						10			10
2	Масломер	32	21					64						64			64
...	...																
...	...																
	Итого													1300			1200
																	1300

[illegible]

Функции	Потребители		Мощность одного по- требителя вт	Число потребителей	Коэффициент одновре- менности	Суммарная мощность одновременно работающих потре- бителей по этапам полета в вт												
	Наиме- нование	№				Подго- товка к полету	Рулежка		Взлет		Полет		Посадка		Рулежка			
						До 5 сек	До 5 мин	Длитель- ность	До 5 сек	До 5 мин	Длитель- ность	До 5 сек	До 5 мин	Длитель- ность	До 5 сек	До 5 мин	Длитель- ность	
9	Автоматическое обопудование	1	Автопилот	600	10,5						300				300			
		.																
		.	.															
			Итого					100		100	400		400		400		100	
10	Освещение	1	Освещение са- лонов	10	40,75			300		300	300				300			300
		2	Освещение от- секов	10	20,5			100										
		3	Фары	108	40,5										216		216	
		.																
		.	.															
			Итого					1200		1200	1200		1100		1200		1200	

[illegible]

Функции	Потребители		Мощность одного по- требителя вт	Число потребителей	Коэффициент однове- ременности	Суммарная мощность одновременно работающих потре- бителей по этапам полета в вт											
	№	Наименование				Подго- товка к полету	Рулежка		Взлет		Полет		Посадка		Рулежка		
	№	Наименование	до 5 сек	до 5 мин	длин- тельно	до 5 сек	до 5 мин	длин- тельно	до 5 сек	до 5 мин	длин- тельно	до 5 сек	до 5 мин	длин- тельно	до 5 сек	до 5 мин	длин- тельно
Топливная си- стема	15	1															
		ки															
	2	Насосы пере- качки															
		.															
		.															
		.															
											</						

максимальном включении обогревательных элементов, осветительных устройств и бытового оборудования.

Учитывая коэффициент одновременности включения потребителей, разряженность аккумуляторных батарей во время запуска и необходимый резерв мощности на случай выхода из строя одного или двух генераторов, определяется их число и мощность. Для данного самолета этим условиям удовлетворяют четыре генератора мощностью по 12 кВт, обеспечивающие резерв мощности около 100%. Кратковременные перегрузки продолжительностью 5 сек или 5 мин обеспечиваются за счет перегрузочной способности генераторов и аккумуляторов.

График нагрузок строится для статических режимов работы потребителей по их номинальной мощности. Если мощность потребителя за рабочий цикл неравномерна, то следует брать среднеквадратичное значение мощности, которое необходимо учитывать только для потребителей средней и повышенной мощности.

Аккумуляторные батареи выбираются в зависимости от их назначения. На рассматриваемом самолете аккумуляторы выполняют следующие функции:

1. Обеспечивают автономный запуск авиадвигателей.
2. Снабжают потребителей электроэнергией при частичной подготовке к полету.
3. В полете покрывают пики нагрузок.
4. Служат резервным источником энергии при отказе генераторов в полете.
5. Снабжают энергией радиостанцию при вынужденной посадке.

Для выбора аккумуляторной батареи задаются ориентировочно ее типом и проверяют емкость с точки зрения обеспечения графика нагрузки. При расчетах начальная емкость аккумулятора берется 70% от номинальной, при этом остаточная емкость к концу полета должна быть не менее 20—22% от номинальной. Емкость аккумулятора, теряемая при разрядке, и емкость, приобретаемая в процессе зарядки, рассчитывается по формулам, приведенным в разд. 4. Данные расчета удобно заносить в табл. 3. Для данного самолета выбираются два аккумулятора типа 12-САМ-28 емкостью по 28 а. ч. и соответственно проверяется необходимая емкость с учетом 4—5 запусков авиадвигателей; остаточная емкость при этом не должна быть меньше 20% от номинальной.

Аналогично строятся графики нагрузок для однофазного и трехфазного переменного тока.

Параллельно с разработкой принципиальных электросхем и компоновкой оборудования создается общая схема размещения основных агрегатов и коммуникаций проводов электрооборудования. Схема наносится на двух основных проекциях самолета с вынесением некоторых характерных узлов размещения агрегатов, разъемов проводов и проходов мест, насыщенных другим оборудовани-

Таблица 3

№ этапа полета	Продолжительность этапа полета	Характер работы (разряд, заряд)	Средняя величина то- ка разряда	Расходуемая емкость разряда	Температура электро- лита	Остаток емкости от предыдущего этапа в % к номинальной	Приведенная номи- нальная емкость акку- мулятора при задан- ных токе и температу- ре	Величина отданной или полученной емкости в % от номинальной	Остаточная емкость к концу этапа в % от номинальной
----------------	-----------------------------------	------------------------------------	------------------------------------	--------------------------------	------------------------------	--	--	---	---

ем. Особенно тщательно прорабатываются места, где наиболее вероятна возможность повреждения электрооборудования.

После выполнения графических и расчетных работ составляется краткое описание, в котором отражаются принцип действия систем, основные электрические параметры, конструктивные и эксплуатационные особенности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бертинов А. И., Авиационные электрические генераторы, Оборонгиз, 1959.
2. Бертинов А. И., Электрические машины авиационной автоматики, Оборонгиз, 1961.
3. Брускин Д. Э., Электрооборудование самолетов, Госэнергоиздат, 1956.
4. Васильева Н. П., Гашковец И. С., Логические элементы в промышленной автоматике, Госэнергоиздат, 1962.
5. Готовский М. В., Пособие по проектированию и расчету элементов и систем авиационного электрооборудования, Оборонгиз, 1961.
6. Дружинин Г. В., Надежность устройств автоматики, издательство «Энергия», 1964.
7. Каганов И. Л., Электронные и ионные преобразователи, Госэнергоиздат, 1956.
8. Костенко М. П. и Пиотровский Л. М., Электрические машины, Госэнергоиздат, 1957, ч. I, 1958, ч. II.
9. Коробан Н. Т., Авиационные аккумуляторы, Оборонгиз, 1945.
10. Кулебакин В. С., Морозовский В. Т., Синдеев И. М., Электроснабжение самолетов, Оборонгиз, 1956.
11. Ларионов А. Н. (под ред.), Основы электрооборудования самолетов и автомашин, Госэнергоиздат, 1955.
12. Маликов И. М., Половко А. М., Романов Н. А., Чукреев П. А., Основы теории и расчета надежности, Судпромгиз, 1960.
13. Петров Г. Н., Электрические машины, ч. II, Госэнергоиздат, 1963.
14. Розенблат М. А., Магнитные усилители, Советское радио, 1956.
15. Семичастнов М. Ф., Монтаж оборудования самолетов, Оборонгиз, 1955.
16. H. Zeffert, Principles and Practice of Aircraft Electrical Engineering, London, 1960.
17. Aircraft Engineering, V, 1955.
18. Flight, 21 January, 1955.
19. Alee Transactions, vol. 76, p. II, IX, 1957.
20. Electrical Manufactures, 1958, vol. 3, No. 2.
21. Bull. Soc Franc electriciens, 1959, No. 104.
22. Aeroplane and Astronautics, 15 May, 1959.
23. Aeronautics, 1959, 31, No. 4, 50—53.
24. Aircraft Engineering, No. 394, XII, 1961.
25. Aeronautics, VIII, 1961.
26. Aeroplane, 1961, No. 2604.
27. Aircraft Engineering, 1962, vol. 34, No. 404.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	Стр. 3
-----------------------	-----------

РАЗДЕЛ ПЕРВЫЙ

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

<i>Глава I. Общие вопросы электрификации летательных аппаратов</i>	5
§ 1. Роль систем электроснабжения и их классификация	5
§ 2. Краткий исторический очерк развития систем электроснабжения летательных аппаратов	8
§ 3. Условия работы систем электроснабжения	11
§ 4. Основные технические требования к системам электроснабжения летательных аппаратов	12
<i>Глава II. Методика проектирования электрических систем летательных аппаратов</i>	13
§ 1. Разбивка электрооборудования по функциям и отсекам	13
§ 2. Система нумерации принципиальных электросхем, агрегатов и проводов	16
§ 3. Система нумерации полумонтажных схем, монтажных схем и конструктивных чертежей	18
§ 4. Методика построения принципиальных электросхем	26
§ 5. Методика построения полумонтажных электросхем	30
§ 6. Методика построения монтажных электросхем	32
§ 7. Методика построения фидерных электросхем	34
<i>Глава III. Этапы проектирования электрических систем летательных аппаратов</i>	36
§ 1. Этапы проектирования	36
§ 2. Эскизное проектирование	36
§ 3. Макетирование	42
§ 4. Рабочее проектирование	43
§ 5. Монтаж опытного образца	43
§ 6. Заводские испытания опытного образца	44
§ 7. Государственные испытания опытного образца	44
§ 8. Запуск в серийное производство	45

РАЗДЕЛ ВТОРОЙ

КРИТЕРИИ ВЕСА И НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

<i>Глава I. Критерии веса электрооборудования</i>	46
§ 1. Полетный вес электрооборудования	46

§ 2. Определение веса электрооборудования	49
§ 3. Относительный вес электрооборудования	51

Глава II. Надежность электрооборудования 53

§ 1. Проблема надежности электрооборудования	53
§ 2. Основные понятия и параметры в расчетах надежности	55
§ 3. Краткие сведения из теории вероятностей в приложении к расчету надежности	60
§ 4. Пути повышения надежности	66
§ 5. Методы и способы резервирования	68
§ 6. Ориентировочный расчет надежности энергетических систем	70

РАЗДЕЛ ТРЕТИЙ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Глава I. Системы передачи и распределения электрической энергии 78

§ 1. Основные элементы и классификация электрических сетей	78
§ 2. Основные технические требования к электрической сети	80
§ 3. Системы передачи электрической энергии постоянного тока	82
§ 4. Системы передачи электрической энергии переменного тока	85
§ 5. Системы распределения электрической энергии	88
§ 6. Конфигурация питательных сетей	93

Глава II. Защита электрических сетей летательных аппаратов 103

§ 1. Назначение, основные требования и классификация защиты сетей	103
§ 2. Максимально-токовая защита сетей постоянного тока	105
§ 3. Максимально-токовая защита сетей переменного тока	111
§ 4. Дифференциальная защита питательных сетей переменного тока	114
§ 5. Дифференциальная защита трехфазных сетей на сумматорах	116

Глава III. Расчет электрических сетей летательных аппаратов 120

§ 1. Особенности расчета электрических сетей	120
§ 2. Качество и допустимые потери напряжения в сети	122
§ 3. Расчет сечений проводов на допустимые нагрузки и потери напряжения	124
§ 4. Влияние точности регулирования напряжения на расчет питательной сети	129
§ 5. Расчет токов короткого замыкания электрической сети	136

РАЗДЕЛ ЧЕТВЕРТЫЙ

ПЕРВИЧНЫЕ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Глава I. Общие сведения об энергосистемах постоянного тока 139

§ 1. Роль первичной энергетической системы постоянного тока	139
§ 2. Основные технические требования к энергосистемам постоянного тока	139
§ 3. Охлаждение генераторов постоянного тока	141

Глава II. Источники энергии постоянного тока 142

§ 1. Авиационные аккумуляторы	142
§ 2. Генераторы постоянного тока	148
§ 3. Бесконтактные генераторы постоянного тока	149

Глава III. Регулирование напряжения и защита генераторов постоянного тока 152

§ 1. Регулирование напряжения генераторов постоянного тока	152
§ 2. Система точного регулирования напряжения и защиты от перенапряжений	156
§ 3. Защита генераторов постоянного тока и их фидеров	161

	<i>Стр.</i>
Глава IV. Параллельная работа источников энергии постоянного тока . . .	165
§ 1. Особенности параллельной работы генераторов постоянного тока . . .	165
§ 2. Место присоединения регуляторов напряжения	167
§ 3. Параллельная работа двух генераторов равной мощности	169
§ 4. Параллельная работа нескольких генераторов равной мощности	172
§ 5. Параллельная работа генераторов с аккумуляторами	173
Глава V. Схемы первичных энергосистем постоянного тока	176
§ 1. Защита генераторных шин и соединительных линий	176
§ 2. Энергосистема постоянного тока с радиальной питательной сетью	178
§ 3. Энергосистема постоянного тока с магистральной питательной сетью	179
§ 4. Энергосистема постоянного тока с радиально-магистральной, резервированной, защищенной питательной сетью	181
§ 5. Энергосистема постоянного тока с комбинированной, незащищенной питательной сетью	183
§ 6. Энергосистемы постоянного тока с кольцевыми многоканальными защищенными питательными сетями	185
 РАЗДЕЛ ПЯТЫЙ 	
ПЕРВИЧНЫЕ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА	
Глава I. Общие сведения об энергосистемах переменного тока	189
§ 1. Особенности систем переменного тока	189
§ 2. Основные технические требования к энергосистемам переменного тока	190
§ 3. Выбор основных параметров энергосистемы переменного тока . .	192
§ 4. Классификация генераторов переменного тока	198
Глава II. Приводы постоянной скорости	202
§ 1. Классификация и основные технические требования к приводам постоянной скорости	202
§ 2. Автоматическое регулирование скорости вращения привода . .	204
§ 3. Механические приводы постоянной скорости	207
§ 4. Простой гидравлический привод	209
§ 5. Гидромеханический привод с гидравлическим дифференциалом (тип 1)	213
§ 6. Гидромеханический привод с гидравлическим дифференциалом (тип 2)	220
§ 7. Гидромеханический привод с планетарным дифференциалом . .	223
§ 8. Простой пневматический привод	226
§ 9. Пневмомеханический дифференциальный привод постоянной скорости с пневмостатическим агрегатом регулирования	227
§ 10. Пневмомеханический дифференциальный привод постоянной скорости с пневмостатическим агрегатом регулирования	233
§ 11. Электрические приводы постоянной скорости	237
Глава III. Регулирование напряжения генераторов переменного тока . . .	244
§ 1. Особенности регулирования напряжения	244
§ 2. Схемы включения чувствительного элемента регулятора напряжения	245
§ 3. Автоматическое регулирование напряжения синхронных генераторов	248
Глава IV. Параллельная работа генераторов переменного тока	253
§ 1. Общие сведения о параллельной работе синхронных генераторов	253
§ 2. Мощность синхронного генератора	256
§ 3. Работа генератора холостую	260

	<i>Стр.</i>
§ 4. Работа генератора параллельно с сетью при постоянном возбуждении и переменной активной мощности ($i_b = \text{const}$, $P = \text{var}$)	261
§ 5. Работа генератора параллельно с сетью при переменном возбуждении и постоянной активной мощности ($i_b = \text{var}$, $P = \text{const}$)	262
§ 6. Параллельная работа генераторов сравнимой мощности	264
§ 7. Распределение реактивной мощности при параллельной работе синхронных генераторов	266
§ 8. Распределение активной мощности при параллельной работе синхронных генераторов	269
§ 9. Автоматическое регулирование частоты	273
§ 10. Синхронизация генераторов при включении на параллельную работу	275
§ 11. Поведение энергосистемы при неисправности привода и роль муфты свободного хода	277
Глава V. Защита и управление синхронных генераторов	278
§ 1. Общие положения	278
§ 2. Максимально-токовая релейная защита	280
§ 3. Продольная дифференциальная токовая защита	281
§ 4. Защита при аварийном отклонении напряжения и частоты	283
§ 5. Принципы построения систем защиты и управления генераторами	285
Глава VI. Схемы первичных энергосистем переменного тока	290
§ 1. Схемы управления и защиты энергосистем	290
§ 2. Энергосистема переменного тока нестабильной частоты	295
§ 3. Энергосистема переменного тока с раздельной работой генераторов	300
§ 4. Энергосистема переменного тока с параллельной работой генераторов	301
§ 5. Энергосистема переменного тока с двумя автономными системами	303
 РАЗДЕЛ ШЕСТОЙ ВТОРИЧНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ	
Глава I. Вторичные энергосистемы переменного тока	305
§ 1. Роль вторичной энергосистемы переменного тока	305
§ 2. Преобразователи постоянного тока в переменный	306
§ 3. Автоматическое регулирование выходного напряжения преобразователей	312
§ 4. Стабилизация частоты переменного тока преобразователей	316
§ 5. Вторичные энергосистемы однофазного переменного тока	319
§ 6. Вторичные энергосистемы трехфазного переменного тока	324
Глава II. Вторичные энергосистемы постоянного тока	328
§ 1. Роль вторичной энергосистемы постоянного тока	328
§ 2. Схемы включения вентилях при выпрямлении переменного тока	329
§ 3. Схемы трансформаторно-выпрямительных блоков (ТВБ)	332
§ 4. Раздельная работа трансформаторно-выпрямительных блоков (ТВБ)	341
§ 5. Особенности параллельной работы трансформаторно-выпрямительных блоков (ТВБ)	343
§ 6. Параллельная работа ТВБ на сосредоточенную нагрузку	345
§ 7. Параллельная работа ТВБ на разнесенную нагрузку	347
§ 8. Вторичная энергосистема постоянного тока с раздельной работой ТВБ	349
§ 9. Вторичная энергосистема постоянного тока с раздельной работой и резервированием выпрямительных блоков	351
	411

	Стр.
§ 10. Вторичная энергосистема постоянного тока с параллельной работой ТВБ	353
§ 11. Вторичная энергосистема постоянного тока с параллельной работой ТВБ в кольцевой схеме	355
РАЗДЕЛ СЕДЬМОЙ	
СИСТЕМЫ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ	
<i>Глава I. Общие сведения по системам энергоснабжения</i>	358
§ 1. Схемы соединений главных распределительных шин	358
§ 2. Основные системы энергоснабжения	359
§ 3. Выбор системы электроснабжения	365
§ 4. Тенденции развития энергетических систем	367
<i>Глава II. Энергоснабжение летательных аппаратов с основной системой постоянного тока</i>	371
§ 1. Энергоснабжение летательного аппарата от генераторов постоянного тока	371
§ 2. Энергоснабжение летательного аппарата от генераторов постоянного и переменного тока	373
<i>Глава III. Энергоснабжение летательных аппаратов с основной системой переменного тока</i>	374
§ 1. Энергоснабжение летательного аппарата от генераторов переменного тока нестабильной частоты	374
§ 2. Энергоснабжение летательного аппарата при раздельной работе генераторов переменного тока постоянной частоты	377
§ 3. Энергоснабжение летательного аппарата при параллельной работе генераторов переменного тока постоянной частоты	382
§ 4. Энергоснабжение летательного аппарата от двух автономных систем переменного тока постоянной частоты	386
§ 5. Энергоснабжение летательного аппарата при комбинированной системе включения генераторов переменного тока постоянной частоты	388
<i>Приложение. Пример разработки эскизного проекта пассажирского самолета</i>	392
<i>Литература</i>	407

Григорий Дмитриевич Власов

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Издательский редактор С. И. Виноградская Техн. редактор Н. Н. Скотникова

Г-47096 Подписано в печать 3/IV 1967 г. Учетно-изд. л. 26,66

Формат бумаги 60×90¹/₁₆=13,38 бум. л.—26,75 печ. л., в т. ч. 1 вкл.

Цена 1 р. 56 к. Тираж 3500 экз. Тем. план 1966 г. № 264

Заказ 2163/1906

Московская типография № 8 Главполиграфпрома
Комитета по печати при Совете Министров СССР,
Хохловский пер., 7

Замеченные опечатки

Страница	Строка	Напечатано	Должно быть
200 201	Графа 6, 5 снизу Графа 6, 3, 4, 8, 10 сверху	$400 \pm 2\%^{**}$ λ^*	$400 \pm 2\%^{***}$ λ

Зак. № 2163/1906